



Universidad
Carlos III de Madrid

INSTRUMENTACIÓN DE UNA BICICLETA DE DESCENSO BASADA EN ACELERÓMETROS

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y
Automática

Autor: Alejandro Ruiz González

Tutor: José Antonio García Souto

Leganés, Febrero de 2017

Título: Instrumentación de una bicicleta de descenso basada en
acelerómetros

Autor: Alejandro Ruiz González

Director: José Antonio García Souto

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Grado el día __ de _____ de
20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de
Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

En primer lugar agradezco a José Antonio García Souto por hacer posible el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado y por su ayuda a lo largo del mismo sin él todo esto no habría sido posible.

Agradezco también a los técnicos del laboratorio que me han proporcionado el material necesario y han fabricado las PCBs necesarias.

Así mismo les doy las gracias a todos los amigos tales como Andrey, Manuel, Jorge, Carlos, Alberto y Jorge, y familiares que han sido un apoyo prestando su ayuda o consejos.

Gracias a la universidad por darme los medios para la realización del TFG tales como los ordenadores con programas con licencia o como las impresoras 3D.

Finalmente gracias a Alberto García y Francisco Valera de Ingeniería Telemática la plantilla inicial de la que está ha sido adaptada.

Gracias a todos

Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se ha realizado el diseño e implementación de un sistema electrónico de monitorización de una bicicleta de descenso basado en un micro-controlador, en concreto Arduino Due, que monitoriza cuatro acelerómetros cuyos datos pueden exportarse para su posterior análisis. El sistema es capaz de registrar los datos con una frecuencia de hasta 730Hz y durante 32,5h.

El cometido del sistema es prestar una ayuda complementaria al ciclista sobre el comportamiento de la suspensión con el fin de conseguir unos reglajes correctos. Existen dispositivos en el mercado que utilizan sensores de desplazamiento lineal y en este proyecto se realiza una solución alternativa usando acelerómetros.

Este proyecto incluye el acondicionamiento e interfaces de los sensores, la integración con plataforma Arduino y su programación, la caracterización del sistema en laboratorio, la prueba de aplicación en campo y el análisis de datos mediante MATLAB.

Se han diseñado unos soportes personalizados con Solid Edge para instalar los sensores de la mejor forma posible. Posteriormente se ha utilizado una impresora 3D para su fabricación.

Se han realizado tres tipos de prueba de campo. Una prueba para la caracterización del sistema, otra prueba en un entorno controlado y una prueba en un circuito de descenso oficial.

Palabras clave: bicicleta, monitorización, acelerómetro, Arduino, descenso, instrumentación, impresión 3D

Abstract

In this Work End of Degree has carried out the design and implementation of an electronic system of monitoring of a bicycle of decrease based on a micro-controller, on concrete Arduino Due, which monitors four accelerometers which information can be exported for his later analysis. The system is capable of registering the information with a frequency of up to 730Hz and during 32,5h.

The assignment of the system is to give a complementary help to the cyclist on the behavior of the suspension in order to obtain a few correct adjustments. Devices exist on the market that there use sensors of linear displacement and in this project an alternative solution is realized using accelerometers.

This project includes the conditioning and interfaces of the sensors, the integration with platform Arduino and his programming, the characterization of the system in laboratory, the test of application in field and the analysis of information by means of MATLAB.

A few supports personalized with Solid Edge have been designed to install the sensors as best as possible. Later a printer has been in use 3D for his manufacture.

Three types of field trial have been realized. A test for the characterization of the system, other one tries in a controlled environment and a test in a circuit of official decrease.

Keywords: bike, monitoring, accelerometer, Arduino, downhill, instrumentation, 3D printing

Índice general

Contenido

1. CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Motivación	1
1.2 Entorno socio-económico.....	1
1.3 Objetivos	2
1.4 Marco regulador. Legislación aplicable.....	2
1.5 Fases del desarrollo	2
1.6 Medios empleados.....	3
1.7 Estructura de la memoria	4
2. CAPÍTULO 2 INSTRUMENTACIÓN EN BICICLETAS DE DESCENSO	7
2.1 Bicicleta de descenso	7
2.1.1 Evolución histórica de la bicicleta.....	7
2.1.2 Componentes de una bicicleta	10
2.1.3 Disciplinas del ciclismo.....	14
2.1.4 Suspensiones.....	15
2.2 Sistemas electrónicos de instrumentación en bicicletas de descenso.....	25
2.2.1 Telemetría profesional.....	25
2.2.2 Telemetría comercial	27
2.2.3 Alternativas.....	28
2.3 Introducción a los acelerómetros	29
2.3.1 Características de un acelerómetro.....	29
2.3.2 Tipos de acelerómetros.....	30
2.3.3 Instrumentación electrónica del acelerómetro.	33
2.3.4 Tecnología MEMS	33
2.3.5 IMU.....	33
3. CAPÍTULO 3 DISEÑO DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN A BORDO	35
3.1 Descripción del sistema propuesto.....	35
3.1.1 Diagrama de bloques.....	35
3.1.2 Especificaciones.....	36
3.1.3 Caracterización con prueba de laboratorio	38
3.2 Selección de acelerómetros	39
3.2.1 Características del sensor MMA7341L	43
3.2.2 Características del sensor MPU6050.....	45
3.3 Selección del micro-controlador	46
3.3.1 Introducción.....	46
3.3.2 Plataforma Arduino	47
3.3.3 Características del ArduinoDue	48
3.4 Dispositivos auxiliares	49
3.4.1 Batería	49
3.4.2 Pantalla LCD HD44780	50
3.4.3 Adaptador de tarjetas microSD	51
4. CAPÍTULO 4IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN.....	53
4.1 Sistema electrónico implementado	53
4.1.1 Alimentación	54
4.1.2 Integración del sensor MPU6050.....	55
4.1.3 Integración del sensor MMA7341L	56
4.1.4 Integración de la pantalla LCD HD44780 16x2	60

4.1.5	Conexión del lector de tarjetas microSD y Arduino	61
4.1.6	Conexión entre Arduino y PC.....	62
4.1.7	Distribución de la alimentación a los dispositivos	63
4.2	Calibración de los acelerómetros	65
4.2.1	Ajuste de la resolución del sensor MMA7341	65
4.2.2	Calibración estática del sensor MMA7341L.....	66
4.2.3	Calibración estática del sensor MPU6050.....	69
4.3	Implementación software	71
4.3.1	Programación del sistema micro-controlador.....	71
4.3.2	Análisis de datos mediante MATLAB.....	74
4.4	Soportes Mecánicos del sistema.....	79
4.4.1	Elementos del sistema situados en la suspensión delantera	79
4.4.2	Elementos del sistema situados en la suspensión trasera.....	84
4.4.3	Elementos del sistema situados en la unidad central	86
5.	CAPÍTULO 5. PRUEBAS DE CAMPO	89
5.1	Instalación del sistema en la bicicleta	89
5.2	Caracterización.....	91
5.2.1	Montaje con sensor de referencia.....	91
5.2.2	Respuesta del sistema	93
5.3	Pruebas de campo.....	95
5.3.1	Test con obstáculo definido	95
5.3.2	Test en circuito de descenso	103
6.	CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	107
6.1	Conclusiones	107
6.2	Trabajo futuro.....	108
	Implementar una comunicación inalámbrica	108
	Sustituir los acelerómetros analógicos.....	109
7.	PRESUPUESTO	111
	Diagrama de Gantt	111
	Presupuesto	111
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	117
9.	ANEXOS	119
	Anexo 1. Planos acotados del soporte para la horquilla del acelerómetro MMA7341L	119
	Anexo 2. Planos acotados del soporte para la horquilla del acelerómetro MPU6050	121
	Anexo 3. Planos acotados del soporte para el chasis del acelerómetro MMA7341L	124
	Anexo 4. Planos acotados del soporte para el chasis del acelerómetro MPU6050.....	125
	Anexo 5. Tipos de bicicleta.....	127
	Anexo 6: Integración numérica. Regla del trapecio.....	133
	Anexo 7. Programación ArduinoDue.....	135
	Sensor MPU6050.....	135
	Sensor MMA7341L	136
	Módulo lector microSD.....	136
	LCD HD44870.....	137

Índice de figuras

Figura 1. Celerífero.	7
Figura 2. Draisiana.	8
Figura 3. Bicicleta creada por Macmillan.	8
Figura 4. Bicicleta de rueda alta.	9
Figura 5. Bicicleta de John Kemp Starley.	9
Figura 6. Componentes de una bicicleta.	10
Figura 7. Características de una bicicleta.	12
Figura 8. Características amortiguador trasero.	13
Figura 9. Bicicleta de descenso.	14
Figura 10. Amortiguador muelle vs aire.	17
Figura 11. Amortiguador de aire vs resorte.	18
Figura 12. Válvula.	20
Figura 13. Dial de compresión.	20
Figura 14. Ilustración de una palanca.	21
Figura 15. Sistema monopivote.	23
Figura 16. Sistema pivote virtual.	23
Figura 17. Doble pletina vs simple pletina.	24
Figura 18. Sistema telemetría [5].	26
Figura 19. Sensor desplazamiento suspensión [5].	26
Figura 20. Posición acelerómetros del sistema.	29
Figura 21. Colocación de galgas extensiométricas en un acelerómetro.	31
Figura 22. Fenómeno piezoeléctrico.	32
Figura 23. Condensador diferencial.	33
Figura 24. Diagrama del sistema.	35
Figura 25. Esquema del salto.	36
Figura 26. Señal obtenida.	38
Figura 27. Comunicación I2C [16].	40
Figura 28. Comunicación SPI [16].	40
Figura 29. Diagrama de bloques MMA7341L.	44
Figura 30. Acelerómetro MMA7341L.	44
Figura 31. Sensor MPU6050.	45
Figura 32. Diagrama de bloques internos MPU6050.	46
Figura 33. Arduino Due [18].	49
Figura 34. Batería Woxter powerbank 2600 sr.	50
Figura 35. LCD HD44780 y adaptador I2C.	50
Figura 36. Adaptador tarjetas microSD.	51
Figura 37. Diagrama de bloques en detalle del sistema implementado.	53
Figura 38. Conexión Arduino-batería LiPo.	54
Figura 39. Esquema alimentación del sistema mediante batería.	55
Figura 40. Cables de conexión jumper wires.	56
Figura 41. Esquema ilustrativo PCB del sensor MMA7341L.	58
Figura 42. Layout top MMA7341L.	58
Figura 43. Layout bottom MMA7341L.	58
Figura 44. Top PCB MMA7341L.	59
Figura 45. Bottom PCB MMA7341L.	59

Figura 46. Esquema ilustrativo de conexión entre el sensor MMA7341L y ArduinoDue.	60
Figura 47. Localización potenciómetro luminosidad en el adaptador de comunicación de la pantalla LCD HD44780.	61
Figura 48. Localización pines SPI en ArduinoDue [18].	62
Figura 49. Localización puertos micro USB en ArduinoDue [18].	62
Figura 50. Layout PCB alimentación.	63
Figura 51. PCB distribuidora de alimentación.	63
Figura 52. Conectores de la PCB distribuidora de alimentación.	63
Figura 53. Componentes conector Molex y montaje final.	64
Figura 54. Diagrama de programación etapa de comprobación de fallos y test de sensores.	72
Figura 55. Diagrama de programación etapa de programa principal.	73
Figura 56. Regla del trapecio.	76
Figura 57. Posible orientación de los ejes cartesianos de los acelerómetros montados en la horquilla.	80
Figura 58. Diseño de la base para el sensor MMA7341.	81
Figura 59. Diseño de la tapa para el sensor MMA7341.	82
Figura 60. Diseño de la base para el sensor MPU6050.	83
Figura 61. Diseño de la tapa para el sensor MPU6050.	83
Figura 62. Orientación de los ejes cartesianos de los acelerómetros montados en la parte trasera de la bicicleta.	84
Figura 63. Diseño de la base para el chasis del sensor MMA7341.	85
Figura 64. Diseño de la base para el chasis del sensor MPU6050.	85
Figura 65. Distribución espacial de los dispositivos en la caja de la unidad central.	86
Figura 66. Distribución espacial real de los elementos en la caja.	87
Figura 67. Orientación de los ejes X e Y en el montaje real.	89
Figura 68. Posición real de los dispositivos en la bicicleta.	90
Figura 69. Posición real acelerómetro MMA7341L en la bicicleta.	90
Figura 70. Posición real acelerómetro MPU6050 en la bicicleta.	91
Figura 71. Montaje del acelerómetro.	92
Figura 72. Osciloscopio y acondicionador de señal.	92
Figura 73. Señal obtenida en el acelerómetro de referencia.	93
Figura 74. Resultados aceleración eje X en el sensor A en test de respuesta del sistema.	94
Figura 75. Resultados aceleración eje X en el sensor D en test de respuesta del sistema.	94
Figura 76. Esquema explicativo test de obstáculo definido.	95
Figura 77. Ladrillo usado como obstáculo en test.	96
Figura 78. Resultados de aceleración sensor A en eje X en test de ladrillo a 12km/h.	96
Figura 79. Resultados de aceleración sensor D en eje X en test de ladrillo a 12km/h.	97
Figura 80. Resultados de aceleración ambos sensores en eje X en test de ladrillo a 12km/h.	98
Figura 81. Resultados de aceleración sensor A en eje X en test de ladrillo a 22km/h.	99
Figura 82. Resultados de aceleración sensor D en eje X en test de ladrillo a 22km/h.	99
Figura 83. Resultados de aceleración ambos sensores en eje X en test de ladrillo a 22km/h.	100
Figura 84. Dirección vectorial de la fuerza causada por el impacto con un ladrillo.	101
Figura 85. Dirección vectorial de la fuerza causada por el impacto con el suelo.	101
Figura 86. Resultados de aceleración ambos sensores en eje X en test de ladrillo a 22km/h.	102
Figura 87. Recorrido descenso de Morata de Tajuña.	103

Figura 88.Resultados de aceleración sensor A y D ambos en eje X en test de circuito descenso.	104
Figura 89. Resultados de aceleración sensor Ay D ambos en eje Y en test de circuito descenso.	105
Figura 90. Diagrama de Gant semana 1 hasta semana 19.....	111
Figura 91. Diagrama de Gant semana 19 hasta semana 32.....	111
Figura 92. Alzado de la base para el sensor MMA7341.....	119
Figura 93. Planta de la base para el sensor MMA7341.....	120
Figura 94. Alzado de la tapa para el sensor MMA7341.	120
Figura 95. Vista inferior de la tapa para el sensor MMA7341.....	121
Figura 96. Alzado de la base para el sensor MPU6050.	122
Figura 97. Planta de la base para el sensor MPU6050.....	122
Figura 98. Alzado de la tapa para el sensor MPU6050.....	123
Figura 99. Vista inferior de la tapa para el sensor MPU6050.....	123
Figura 100. Alzado de la base del sensor MMA7341 para montaje en chasis.....	124
Figura 101.Vista inferior de la base del sensor MMA7341 para montaje en chasis.....	124
Figura 102. Alzado de la base del sensor MPU6050 para montaje en chasis.	125
Figura 103.Vista inferior de la base del sensor MMA7341 para montaje en chasis.....	126
Figura 104. Bicicleta ciclismo en ruta.....	127
Figura 105.. Bicicleta XC suspensión delantera.	128
Figura 106. Bicicleta XC doble suspensión.	128
Figura 107. Bicicleta de All Mountain.....	129
Figura 108. Bicicleta enduro.	129
Figura 109. Red Bull Rampage.....	130
Figura 110. Bicicleta de freeride.....	131
Figura 111. Bicicleta bmx	131
Figura 112. Bicicleta de dirt.....	132
Figura 113. Bicicleta de trial.....	132
Figura 114.Resultados de aceleración sensor MPU6050 en eje X en test de ladrillo a 12km/h.....	133
Figura 115.Resultados de velocidad sensor MPU6050 en eje X en test de ladrillo a 12km/h.....	133
Figura 116. Resultados de posición sensor MPU6050 en eje X en test de ladrillo a 12km/h.....	134

Índice de tablas

Tabla 1. Acelerómetros valorados.....	42
Tabla 2. Pines de conexión MPU6050 y ArduinoDue.	55
Tabla 3. Pines de conexión MMA7341L y ArduinoDue.	57
Tabla 4. Pines de conexión LCD HD44780 y ArduinoDue.	60
Tabla 5. Pines de conexión lector microSD y ArduinoDue.	61
Tabla 6. Valores de calibración de los sensores MMA73141L.	68
Tabla 7. Calibración estática de los sensores MPU6050.	69
Tabla 8. Costes de elaboración física del sistema de instrumentación.	113
Tabla 9. Costes de los salarios de personal.	114

Capítulo 1 Introducción y objetivos

1.1 Motivación

En las últimas décadas ha sucedido una gran evolución técnica en muchos ámbitos, como por ejemplo el ciclismo, lo que repercute en que los elementos y sistemas sean más fiables, seguros y prácticos, pero a la vez más complejos. Actualmente el mundo del ciclismo cuenta con tecnología que es singular para un usuario básico.

En este proyecto vamos a tratar con bicicletas diseñadas para ir lo más rápido posible por zonas llenas de baches, raíces, piedras, saltos, desniveles, etc. Esta disciplina es conocida como Descenso. Una de las partes más importantes en este tipo de bicicletas son las suspensiones.

El ajuste de los amortiguadores es complejo con infinitud de combinaciones, a lo que se le suman otras posibles alteraciones como puede ser una longitud variable entre los ejes de las ruedas o diferentes anclajes del amortiguador.

El objetivo de este proyecto es diseñar un sistema electrónico de instrumentación original para una bicicleta de descenso capaz de recoger datos que ayuden al usuario a poder ajustar las suspensiones en un nivel óptimo para su correcto funcionamiento.

El planteamiento principal es el empleo de acelerómetros con la función de evaluar la suspensión. Para ello se sitúa un sensor en un elemento antes de la suspensión y otro sensor después de la suspensión. La diferencia entre ambos valores se debe a la absorción de energía producida por la suspensión y nos aporta información sobre su comportamiento.

1.2 Entorno socio-económico

En los últimos 10 años las suspensiones han sufrido un gran avance tecnológico llegando a tener hasta 6 factores de regulación posible, tales como variar la fuerza de la suspensión en función de la velocidad de compresión o extensión, modificar la curva de progresividad, etc.

En el mercado se dispone de equipos completos que recogen datos de aceleración, velocidad y posición según los cuales se registra el comportamiento de la suspensión sobre un terreno con el fin de evaluar su funcionamiento pero presentan un coste elevado ya que emplean sensores de desplazamiento de alto coste.

Existen varias tendencias actuales aún en desarrollo que utilizan otros dispositivos que sustituyen los sensores de desplazamiento potenciométricos (o LVDT) por *encoder* retráctil [10] o un sensor de presión en el aire del amortiguador [11] para obtener un coste final inferior. En este proyecto se desarrolla otra alternativa más.

1.3 Objetivos

En el presente Trabajo Fin de Grado el objetivo principal es el diseño e implementación de un sistema de instrumentación electrónica de una bicicleta de descenso.

Además se fijan los siguientes sub-objetivos:

1. Realizar el acondicionamiento de 4 acelerómetros su integración con el sistema de monitorización.
2. Proporcionar un sistema central de monitorización a bordo capaz de registrar datos durante un circuito completo de descenso, los cuales puedan exportarse para su posterior análisis.
3. Diseñar y fabricar los soportes para una instalación robusta en la bicicleta.
4. Caracterizar el sistema en pruebas de laboratorio y ensayos controlados en campo.
5. Probar el sistema instalado en la bicicleta en condiciones reales de actividad extrema y proporcionar un análisis básico de los datos exportados

1.4 Marco regulador. Legislación aplicable.

Nuestro sistema de instrumentación electrónica para una bicicleta de descenso está orientado para uso particular. Aun así un usuario puede utilizarlo para poner a punto las suspensiones en un recorrido de competición. Ese factor merece un estudio de la legislación deportiva vigente para garantizar que su uso está permitido y que cumplimos las normas.

El reglamento de la Unión Ciclista Internacional (UCI) expone lo siguiente:

“Cada licenciado deberá velar para que su equipamiento (bicicleta con accesorios y dispositivos montados, casco, equipamiento indumentario,...) no presente por su calidad, material o concepción, ningún peligro para sí mismo o para los demás.” (Organización general del deporte ciclista, capítulo 3, artículo 1.3.001)

De esto se deduce que el uso de telemetría está permitido siempre que se fije el equipamiento adecuadamente y no suponga ningún peligro.

1.5 Fases del desarrollo

1. **Estudio del estado del arte:** En esta parte se realiza un estudio del mercado actual sobre sistemas de telemetría para bicicletas. Así mismo también se exponen conceptos básicos necesarios para la comprensión de este proyecto.
2. **Definición del sistema de instrumentación:** En este apartado se decide crear un sistema de instrumentación alternativo a los existentes y que sea capaz de cumplir la misma función.

3. **Caracterización de una bicicleta de descenso:** Se realiza un estudio de las características del sistema compuesto por una bicicleta de descenso y que delimitan el sistema de instrumentación.
4. **Elección de dispositivos:** Se eligen los elementos que componen el sistema acorde a las limitaciones físicas de nuestro sistema a instrumentar.
5. **Aprendizaje de programación del micro-controlador:** Se aprende la programación específica del micro-controlador elegido, en concreto Arduino, con el que realizar la gestión de los datos proporcionados por los sensores del sistema.
6. **Aprendizaje de software de diseño y rutado de PCB y realización de circuito impreso:** En este apartado se aprende a usar un programa de diseño electrónico de rutado (EAGLE) con el fin de poder diseñar las PCBs necesarias para este proyecto.
7. **Aprendizaje de software de diseño 3D y realización de soportes:** En esta parte se aprende a usar un programa de diseño 3D (Solid Edge) con el fin de diseñar unos soportes personalizados para los sensores.
8. **Aprendizaje de utilización de impresoras 3D:** Se aprende el uso de software específico de impresoras 3D y se imprimen los soportes.
9. **Montaje del sistema y pruebas de campo:** Se realiza la integración de todos los dispositivos y elementos mecánicos y se acoplan a la bicicleta. Se realizan pruebas de campo donde se muestra el funcionamiento del sistema.

1.6 Medios empleados

En este Trabajo Fin de Grado se utilizan diversos medios tanto hardware como software.

Los programas software utilizados son los siguientes:

- *Eagle* (con licencia educacional): Este programa se utiliza para realizar diseños de PCBs.
- *Solid edge*V19 (en aulas informáticas): Este software se emplea para el diseño de soportes mecánicos.
- *Matlab R2016b* (con licencia estudiante): Se usa como herramienta para el análisis de datos recogidos por los acelerómetros.
- *Cleverscope*: Se emplea para realizar la configuración del osciloscopio así como para visualizar los datos.
- *IDE Arduino*: Se utiliza para realizar la programación del micro-controlador Arduino Due.

Los medios físicos necesarios son:

- Impresora 3D: Se utilizan para la fabricación de los soportes mecánicos.
- Material para soldadura y montaje de PCB: Se emplean medios materiales como son un soldador, estaño y un taladro para la elaboración de PCBs.

Elementos usados del laboratorio de instrumentación:

- Acelerómetro Brüel&KjaerType 4371V: Acelerómetro establecido como referencia.
- Acondicionador de señal Brüel&KjaerNexus 2690: Dispositivo que proporciona el acondicionamiento para el acelerómetro capacitivo Brüel&KjaerType 4371V.
- Osciloscopio CS328A (con programa Cleverscope): Osciloscopio digital encargado de registrar la señal proporcionada por acondicionador.

1.7 Estructura de la memoria

En este apartado se explica de forma resumida la organización de este Trabajo Fin de Grado con el objetivo de facilitar la lectura del mismo.

Capítulo 1. Introducción y objetivos: En este capítulo se explica la motivación existente para realizar este proyecto junto con la exposición de los objetivos perseguidos y una explicación del propio documento.

Capítulo 2. Instrumentación en bicicletas de descenso: Se expresa de forma resumida los conocimientos previos necesarios relacionados con el descenso y se exponen las tecnologías de ayuda de ajustes de suspensiones existentes. Se realiza una breve introducción a los acelerómetros.

Capítulo 3. Desarrollo del sistema de instrumentación a bordo: Este capítulo contiene el diseño del sistema de instrumentación así como una caracterización de una bicicleta de descenso mediante un test de laboratorio. Los elementos finalmente elegidos que forman el sistema también quedan detallados en este capítulo.

Capítulo 4. Implementación del sistema de instrumentación: Capítulo en el que se detallan las conexiones entre los diferentes dispositivos. Además se incluye un esquema explicativo de la programación seguida y se muestran los soportes 3D personalizados para la sujeción de los sensores en la bicicleta.

Capítulo 5. Pruebas de campo: El contenido de este capítulo es mostrar el funcionamiento del sistema mediante diferentes pruebas de campo.

Capítulo 6. Conclusiones y desarrollo futuro: Se expresan las conclusiones finales extraídas del funcionamiento del sistema de instrumentación así como posibles mejoras futuras de dicho sistema.

Presupuesto: En este apartado se muestra una aproximación del coste de este proyecto detallando los costes de fabricación del sistema y los costes de personal. Además se incluye un diagrama de planificación temporal de las diferentes fases de este proyecto.

Anexos: Se expone información adicional. Contiene los planos acotados de los soportes de los sensores, una explicación en detalle de los tipos de bicicleta existentes y la programación del Arduino Due realizada para este proyecto.

Capítulo 2 Instrumentación en bicicletas de descenso

2.1 Bicicleta de descenso

2.1.1 Evolución histórica de la bicicleta

La bicicleta como la conocemos hoy en día es el resultado de una larga y constante evolución. El primer vehículo reconocido como bicicleta data en 1790 y fue inventado por un francés llamado Mede de Sivrac [1], [2]. Consistía en dos ruedas alineadas unidas por una estructura de madera que en ocasiones simulaba la forma de un animal, el más habitual el caballo, que en lugar de patas tenía ruedas. Otras estructuras eran simplemente una madera que hacía de soporte y asiento para la persona. El movimiento se conseguía con la fuerza motora de la persona al impulsarse con los pies en el suelo. Un ejemplo de esta bicicleta que fue conocida como Celerífero se puede observar en la figura, *figura 1*, a continuación:



Figura 1. Celerífero.

El Celerífero carecía de articulaciones por lo que realizar giros era complejo. El sucesor a este vehículo fue la Draisiana que contaba con un manillar que permitía ir en la dirección que la persona eligiese. Fue inventada en 1817 por el barón Karl Daris, con una forma muy similar a su antecesor como se distingue en la figura, *figura2*.



Figura 2. Draisiana.

Posteriormente, en 1839, el escocés Kirkpatrick Macmillan añadió pedales conectados a la rueda trasera a través de barras que transmiten el movimiento lo que supuso no tener que propulsarse con los pies en el suelo. Con este modelo se logró ejecutar un trayecto de 226 kilómetros de ida y vuelta hasta Glasgow. En la figura, *figura 3*, se percibe en detalle las barras de transmisión del movimiento.



Figura 3. Bicicleta creada por Macmillan.

En 1846 sufrió algunas mejoras realizadas por Gavin Dalzell, que se basó en el modelo de Macmillan, y tuvo gran acogida.

En 1861 los pedales pasaron a ser solidarios a la rueda delantera y se eliminaron las barras de transmisión con ello. El herrero Pierre Michaux fue el inventor.

En 1869 se produjeron grandes avances en el ámbito de la comodidad con los neumáticos de goma maciza y llantas metálicas. El hecho de que los pedales transmitieran la fuerza motriz a la rueda delantera llevó a que a mayor tamaño de rueda

delantera mayor velocidad se lograba conseguir y así es como surgió la bicicleta de rueda alta en 1873 por James Starley. Una imagen de ello es la figura, *figura 4*.



Figura 4. Bicicleta de rueda alta.

Este tipo de bicicleta presentó graves problemas de inestabilidad debido a la altura alcanzada por la obsesión de construir ruedas delanteras cada vez más grandes. Ello conllevó al surgimiento de la bicicleta de seguridad en 1885 creada por John Kemp Starley. La similitud de este modelo con las actuales es palpable ya que cuenta con pedales centrales, cadena, frenos y ruedas de similar tamaño. Tres años más tarde tuvo lugar la revolución de los neumáticos interiores de aire inventados por Dunlop que absorbían las vibraciones del suelo. Este modelo tuvo gran acogida y llegó a tener un coste elevado. Presenta una gran similitud con los modelos actuales como se puede apreciar en la figura, *figura 5*.



Figura 5. Bicicleta de John Kemp Starley.

La evolución en la industria y en los materiales llevo a construir bicicletas más ligeras, seguras y cómodas gracias al empleo de metal en lugar de madera.

Se introdujo también las marchas utilizando desviadores y el neumático desmontable fabricado por Michelin, no obstante Pirelli contaba con su propio diseño.

El interés hacia el uso de las bicicletas fue creciendo y eso hizo que el mercado evolucionase empezaron a surgir las diferentes disciplinas como por ejemplo el *mountainbike* o *bmX*.

En la actualidad es un vehículo muy usado en las ciudades de todo el mundo. Es un medio de transporte limpio, saludable y económico por lo que el pronóstico es que siga creciendo tanto en usuarios como en infraestructuras propias construidas.

2.1.2 Componentes de una bicicleta

La bicicleta estándar primitiva se ha adaptado a diferentes terrenos y diversos usos y el resultado de ello son las diferentes modalidades del ciclismo. Antes de ver cuáles son dichas modalidades vamos a ver de qué piezas está compuesta una bicicleta lo que nos pondrá en situación. Para ello nos apoyaremos en las siguientes ilustraciones: *figura 6*, *figura 7* y *figura 8*.

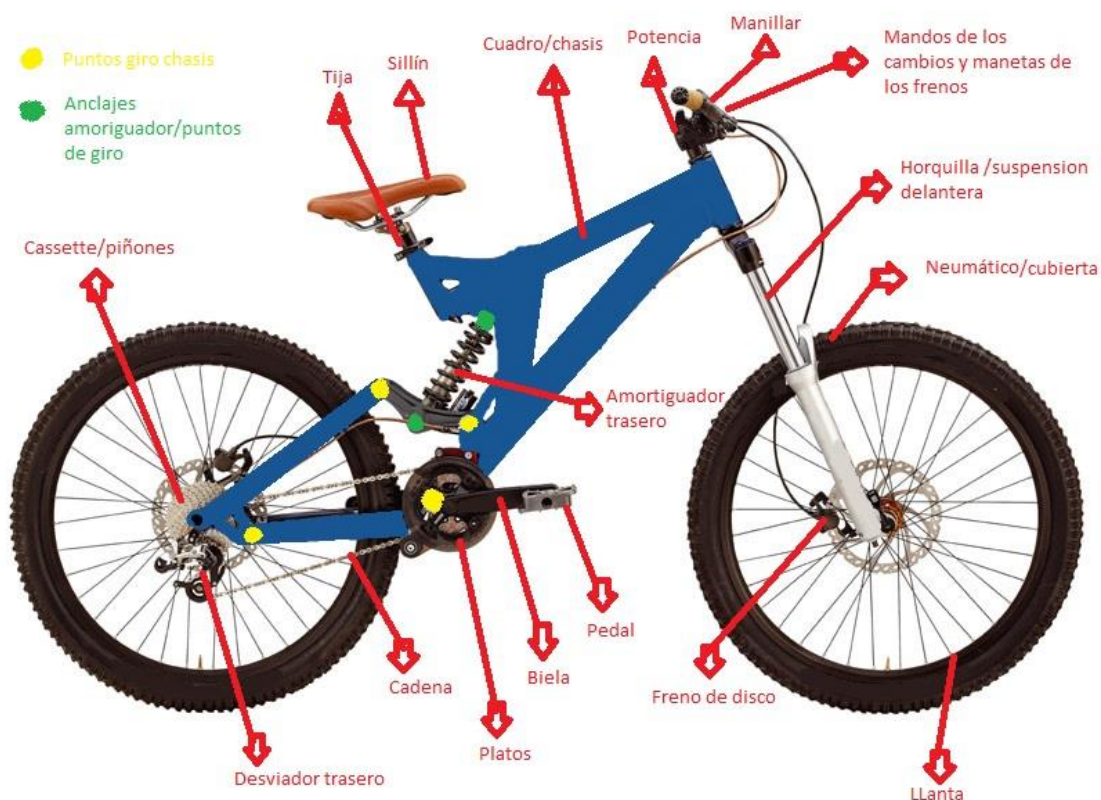


Figura 6. Componentes de una bicicleta.

Cuadro/chasis: Es la estructura soporte de toda la bicicleta y sobre la que se montan todos componentes. Puede ser una estructura rígida o articulada si la bicicleta tiene suspensión trasera como es el caso de la figura, **figura 6** en la que esta resaltado con color amarillo los puntos de giro del propio chasis y en verde los puntos de giro del amortiguador. Los materiales empleados para la construcción del cuadro pueden ser aluminio, cromo-acero, acero, titanio, magnesio (alguna bieleta) o fibra de carbono.

Potencia: Fija el manillar a la horquilla que a su vez es soporte de la rueda delantera de manera que giran solidarios por lo que nos proporciona dirección.

Manillar: Es el encargado de minimizar las fuerzas necesarias para girar en la dirección elegida. Cuanto más ancho sea menor fuerza necesaria. También es soporte para los frenos y mandos del cambio.

Mandos de los cambios y manetas de frenos: Son los accionadores de los cambios y de los frenos respectivamente. Los cambios modifican la tensión de un cable para conseguir el movimiento del desviador mientras que los frenos pueden ser de cable o hidráulicos. Actualmente se han desarrollado cambios electrónicos inalámbricos pero su precio es elevado.

Horquilla/suspensión delantera: Une la rueda delantera al chasis. Puede ser rígida o con amortiguación.

Neumático: Es el único elemento que está en contacto con el suelo. Amortigua las vibraciones del terreno y nos adhiere a él. En su interior se halla la cámara que es la encargada de contener el aire. En modelos actuales hay neumáticos aptos para montar sin cámara únicamente necesitan una válvula, son conocidos como “*Tubeless*”. Su tamaño depende del tamaño de la llanta y hay diferentes anchos. Un ejemplo de medida es 26x2.3. El numero 26 nos indica que el diámetro es 26 pulgadas y el ancho es 2.3 pulgadas.

Llanta: Es el soporte para el neumático permite el giro de esté mediante rodamientos y se une a la horquilla mediante con el eje. Se compone de aro, radios y buje (eje).

Pedal: Su función es ser la estructura sobre la cual realizamos fuerza para conseguir el movimiento de la bicicleta. Tiene rodamientos para permitir seguir el movimiento del pie y está unido a la biela.

Biela: Une el pedal al chasis mediante rodamientos y un eje conocido como pedalier. En la biela derecha se encuentran los platos.

Platos: Son las marchas delanteras de la bicicleta. Para cambiar la marcha es necesario un desviador delantero.

Cadena: Une los platos a los piñones y se encarga de transmitir el movimiento de la pedalada.

Piñones/cassette: Son las marchas traseras y transmiten el movimiento de la pedalada a la rueda trasera provocando el avance de la bicicleta.

Desviador trasero: Es el encargado de cambiar de un piñón a otro. Su funcionamiento es mecánico a través de la tensión de un cable de acero se consigue el desplazamiento.

Tija: Une el sillín al chasis y regula la altura del mismo.

Sillín: Es el asiento para el ciclista

Ya están explicadas las principales partes de una bicicleta ahora con la figura, **figura 7** vamos a estudiar algunas características que dan lugar a los diferentes tipos de bicicleta.



Figura 7. Características de una bicicleta.

En color amarillo podemos observar el diámetro de la rueda cuya unidad de medida es en pulgadas. Lo estándar para bicicleta de montaña es 26" aunque actualmente hay modelos emergentes de 27,5" y 29". Las bicicletas de carretera usan un diámetro de 28" también conocido como 700. El neumático montado en la llanta tiene diferentes anchos posibles.

En color verde está representada la distancia entre ejes que es un indicador directo de lo larga que es la bicicleta. A mayor distancia conseguimos que la bicicleta sea más estable a alta velocidad pero penaliza el giro.

En color rojo está distinguido el ángulo de dirección que representa el ángulo con el que la horquilla inclinada. A mayor ángulo se consigue mayor estabilidad en terrenos con pendiente elevada y a alta velocidad pero se penaliza el giro. En descenso se usan ángulos cercanos a 63° y en modalidades de campo a través ángulos cercanos a 70° .

En color rojo observamos una cota que nos indica el recorrido lineal de la suspensión delantera. El rango de recorrido va desde 80-203mm depende de la modalidad. Hay modelos extremos con 300mm pero actualmente no se fabrican.

Muy relacionado con el recorrido de la suspensión delantera vamos a tratar el recorrido de la suspensión trasera apoyándonos en la siguiente imagen *figura 8*.



Figura 8. Características amortiguador trasero.

La suspensión trasera de una bicicleta es algo complejo que requiere conocimientos de cinemática que se explican brevemente en el apartado de suspensiones del capítulo 2. Aun así en este apartado explicaremos los parámetros de la suspensión trasera. Los factores que influyen en el recorrido final que realiza la rueda trasera son la distancia entre ejes, en color amarillo, y el recorrido del amortiguador, en color verde. Normalmente para una distancia de ejes dada el amortiguador proporciona un recorrido pero hay excepciones como por ejemplo que para una misma distancia haya varias posibilidades de recorrido de amortiguador. Este factor depende de los fabricantes aunque hay una tendencia a la estandarización. El recorrido del amortiguador permite el giro de las articulaciones del cuadro y con ello la rueda trasera hará un recorrido más amplio o uno menor. Este factor es el motivo por el que surgen todas las marcas y modelos de bicicleta ya que para un mismo amortiguador surgen diferentes formas de comprimirlo y obtener más o menos recorrido dependiendo de la palanca que usen las manivelas-bielas del chasis.

En este punto, una vez ya sabemos los conocimientos previos necesarios, se exponen las diferentes modalidades de ciclismo que existen centrándonos en especial detalle en el descenso.

2.1.3 Disciplinas del ciclismo

En general se distinguen cuatro tipos de bicicletas: bicicleta de carretera, de montaña, de montaña doble suspensión y bmx. En nuestro caso nos centramos en el descenso que es una bicicleta de montaña de doble suspensión. Para más información sobre modalidades del ciclismo consultar el *Anexo 5 tipos de bicicleta*.

Descenso/Downhill

Esta modalidad tiene el objetivo de bajar por una montaña lo más rápido posible. No están pensadas para pedalear ya que usan suspensiones de más de 200mm y carecen de marchas delanteras, de platos. Las marchas traseras están pensadas para alta velocidad por lo que los piñones tienen pocos dientes. Las ruedas tienen un grosor de 2,3" a 2,7". El ancho de manillar va desde 750mm a 800mm para un mayor control de la dirección. El ángulo de dirección tiene un rango de 62° a 64°, la altura del eje de pedalier es baja para bajar el centro de gravedad y la distancia entre ejes es mayor que en cualquier otra disciplina. Todo ello nos lleva a que estas bicicletas sean muy estables a alta velocidad y gracias a sus suspensiones de gran recorrido logren absorber piedras, baches, raíces y grandes saltos sin ningún problema. El peso es similar a una bicicleta de freeride aunque con el auge de la fibra de carbono se consiguen pesos inferiores a 15kg. En freeride muchas veces se usa una bicicleta de descenso por ser más resistente al tener mayor recorrido de suspensión y porque la horquilla delantera es doble pletina que aporta una rigidez delantera mayor. El concepto de horquilla de doble pletina se explicará en el siguiente apartado llamado suspensiones. La imagen siguiente *figura 9* nos muestra como es una bicicleta de descenso.



Figura 9. Bicicleta de descenso.

Las competiciones se basan en un recorrido cuesta abajo a contrarreloj de forma individual en el que hay obstáculos naturales como rocas o raíces y obstáculos artificiales

como rampas de madera para fabricar saltos. Los recorridos duran entre 3min y 7min aunque en alguna competición urbana la duración es entre 1min y 2min. Durante la carrera es típico que los pilotos alcancen velocidades comprendidas entre 50km/h a 70km/h en algunos tramos.

Hay competiciones a nivel nacional en cada país y a nivel internacional. En España existe la Real Federación Española de Ciclismo y a nivel mundial contamos con la Unión Internacional Ciclista.

2.1.4 Suspensiones

Las suspensiones son un elemento crucial para una bicicleta y para cualquier vehículo. Estos elementos son los encargados de conseguir control y comodidad. Es cierto que los neumáticos podrían ser tratados como una suspensión porque son los primeros en absorber las irregularidades del terreno pero no tienen ningún control, almacenan la energía del impacto y la devuelven bruscamente. Por ello es necesario añadir un componente que realmente suavice las imperfecciones del terreno.

Una suspensión se compone de dos elementos diferenciados. Por una parte un sistema encargado de almacenar la energía del impacto y por otro lado un sistema encargado de controlar como se absorbe dicha energía y sobre todo como se disipa.

El sistema encargado de almacenar energía es simple y se trata de un muelle, que puede ser de acero o de titanio, o una cámara de aire la cual se comprime.

En el caso de que sea un resorte el sistema tiene un comportamiento lineal dado por la ley de Hooke **(1)**, **(2)**:

$$F = k \times (l - l_0) \quad (1)$$

$$E = \frac{1}{2} \times k \times (l - l_0)^2 \quad (2)$$

F= Fuerza elástica

E= Energía almacenada en el resorte

k = constante elástica

l=longitud del resorte una vez aplicada la carga

l₀=longitud del resorte en reposo

En la ecuación **(1)** podemos observar que la fuerza depende directamente proporcional a la constante elástica del propio muelle y a la compresión que realicemos sobre el mismo. Los fabricantes ponen a disposición diferentes muelles con diferentes constantes elásticas para poder adaptar la suspensión al peso del piloto y así asegurar el correcto funcionamiento.

La deformación posible que sufre un muelle en una bicicleta de descenso en la suspensión delantera va desde el estado de reposo a 20 cm que es máximo posible mecánicamente por el diseño físico que preserva que el muelle siempre trabaje en zona elástica y no se deforme. En el caso de la suspensión trasera el muelle se comprime un recorrido menor ya que se aprovecha el empleo de palanca que hace el propio chasis. Suele ser entre 7cm y 9cm dependiendo del cuadro de la bicicleta.

Podemos extraer como conclusión que el uso de resorte nos proporciona un comportamiento lineal y que para adaptarlo a nuestro peso es necesario utilizar el muelle adecuado.

Cuando el sistema que almacena la energía es una cámara de aire el sistema es un poco más complejo aunque ofrece ventajas al usuario. Tratar con gases tiene un gran problema, el comportamiento del sistema depende de la temperatura. Ello se aprecia en las siguientes leyes de los gases ideales (3), (4):

$$P \times V = n \times R \times T \quad (3)$$

$$\frac{P \times V}{T} = cte \quad (4)$$

P= presión absoluta

V= volumen

n= moles de gas

R= constante universal de los gases ideales

T= temperatura absoluta

En nuestro caso la cámara de aire se comporta como un recipiente cerrado por lo que el número de moles no cambia. No varía una vez que el usuario haya configurado la presión recomendada para su peso a través de una válvula. Por ello la expresión (3) se puede simplificar a la expresión (4). La temperatura del sistema va a ir aumentando debido a las sucesivas compresiones en la cámara del aire provocadas por las irregularidades del terreno pero evaluando el sistema en una única compresión podemos suponer que la temperatura se mantiene constante. Con esta premisa obtenemos la expresión (5).

$$P \times V = cte \quad (5)$$

El trabajo que realiza el gas de la cámara de aire viene dado por la ecuación (6).

$$W = \int_1^2 P \times dV = -F_{exterior} \times \Delta x \quad (6)$$

Sustituyendo la ecuación (5) en la ecuación (6) e integrando obtenemos la expresión (7).

$$cte \times \ln \frac{v_2}{v_1} = -F_{\text{exterior}} \times \Delta x \quad (7)$$

Despejando de la ecuación (7) obtenemos la fuerza para comprimir el amortiguador de aire. El resultado es el siguiente, (8):

$$F_{\text{exterior}} = - \frac{cte \times \ln \frac{v_2}{v_1}}{d} \quad (8)$$

cte = n x R x T
d=desplazamiento, (d2-d1)
V2= Área x (Lo-d)
V1= Área x Lo

La primera diferencia que vemos con respecto a un sistema basado en resorte es que la fuerza no es lineal. Sigue una curva similar a una exponencial esto implica que en la primera parte del recorrido de la suspensión la resistencia que ofrece es menor que el muelle y en el tramo final la fuerza que ejerce es muy elevada. El sistema tiene una gran ventaja ya que es fácilmente ajustable al peso del ciclista mediante una válvula de aire que regula la presión de la cámara. Otro factor a su favor es el menor peso ya que el peso del resorte es elevado. Como parte negativa, el aire es sensible a la temperatura exterior y también tras un largo periodo de funcionamiento el propio calor generado al comprimir el aire influye en el comportamiento del sistema. Unas imágenes ilustrativas del enfrentamiento entre muelle y aire son las siguientes *figura 10, figura 11*:



Figura 10. Amortiguador muelle vs aire.

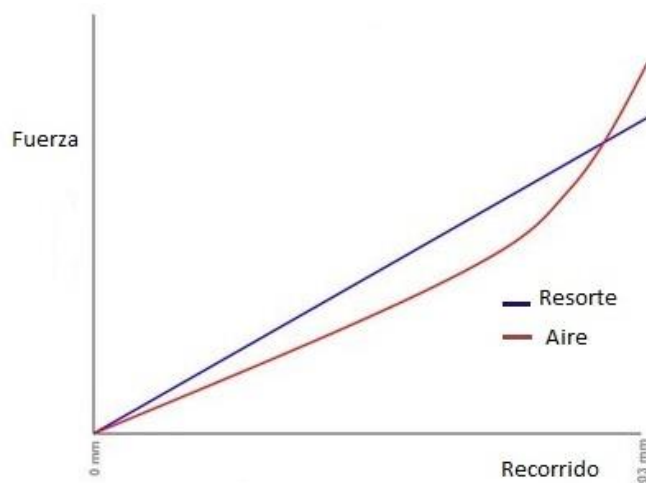


Figura 11. Amortiguador de aire vs resorte.

Los sistemas posibles para almacenar energía ya los hemos valorado a continuación se expone como controlar el proceso de amortiguación ya que sino su comportamiento sería excesivamente oscilatorio y fuera de control. El control se realiza, explicado de forma general, con un circuito hidráulico cuyo fluido empleado es aceite al cual se le fuerza a atravesar válvulas que oponen resistencia. Ello implica que la energía del impacto también se emplea en desplazar aceite y mecánicamente se obstaculiza el movimiento lo que causa que la dicha energía finalmente se transforme en calor. Esto permite ser capaces de controlar la velocidad de compresión y expansión de la suspensión [3].

Los fabricantes de suspensiones crean y mejoran las válvulas, pistones y el circuito hidráulico constantemente. Existen diversos modelos como el baño abierto en el que el aceite coexiste en contacto directo con aire en la misma cavidad o como el baño cerrado en la que el aceite está aislado evitando el fenómeno de aireación.

A continuación vamos a explicar los diferentes tipos de control que podemos ejercer gracias al sistema hidráulico centrándonos en una bicicleta de descenso.

Control de hundimiento o SAG

Es necesario que la suspensión bajo el peso del ciclista se comprima. Este hundimiento nos permite que ante baches negativos la suspensión se estire y la rueda siga en todo momento en contacto con el suelo. En descenso el SAG óptimo es el que se sitúa entre un 25% y un 35% del recorrido total de la suspensión. Se regula mediante la precarga del muelle o en una suspensión de aire con la presión según el peso del ciclista. (Realmente no es un control ejercido por el sistema hidráulico).

Control compresión baja velocidad

Se produce cuando la velocidad de compresión es pequeña. Por ejemplo cuando el piloto cambia de posición, fuerzas creadas al pedalear, en transiciones de inclinación suaves, en curvas y en general cuando los obstáculos no son atroces. En el caso de que estrangulásemos más la válvula que obstaculiza el paso del aceite obtendríamos una suspensión más rígida ante dichas situaciones. El objetivo es regular hasta conseguir un punto en el que la suspensión amortigüe pero su funcionamiento no sea muy blando ya que resta agilidad.

Control compresión alta velocidad

Los impactos que ocasionan alta velocidad de compresión tales como el aterrizaje de un salto o grandes baches. Normalmente la válvula que regula esta compresión es una válvula de muelle y nosotros actuamos sobre la precarga de dicho muelle. Si comprimimos el muelle logramos obstaculizar más el paso del aceite y la suspensión se comportara más dura. El objetivo es obtener un amortiguamiento eficaz evitando que la suspensión agote todo su recorrido, es decir que no “toque fondo”.

Control rebote baja velocidad

Rebote es el nombre que recibe el retorno de energía acumulada por el muelle o el aire comprimido en un amortiguador de aire. La energía almacena cuando se produce una compresión a baja velocidad no es muy elevada aun así mediante una válvula podemos regular el retorno de esta. El rebote óptimo en este caso es aquel que persigue que el sistema realice una sola oscilación y a su vez sea capaz de recuperar el recorrido comprimido de la suspensión cuando se transita un terreno con obstáculos muy consecutivos.

Control rebote alta velocidad

Cuando la suspensión ha recibido un gran impacto la energía acumulada es grande y el rebote es fuerte. Para controlar esta situación mediante una válvula de muelle regulable entorpecemos el paso del aceite de retorno. Se persigue que la suspensión recupere el recorrido de forma rápida evitando al mismo tiempo que sea de forma brusca e inestable para el ciclista.

Control de “*bottomout*”

El “*bottomout*” se produce cuando la suspensión ha agotado todo el recorrido disponible. Para evitar que ocurra esto, en las suspensiones de aire, se modifica la cámara de aire reduciéndola para que el funcionamiento sea más progresivo.

Por lo general, estas son las posibles regulaciones en las suspensiones tanto si es horquilla o amortiguador trasero en una bicicleta de descenso. La mayoría de las marcas ponen a disposición todos los reglajes aunque otras solo ofrecen un rebote y compresión a baja velocidad u ofrecen un sistema propio de compresión como el caso de la marca Manitou Dorado y su sistema TCP+. Las regulaciones quedan accesibles al ciclista a

través de unos diales externos manipulables con la mano. Unas imágenes que nos muestran las válvulas y los diales [3] son las siguientes *figura 12, figura 13*:

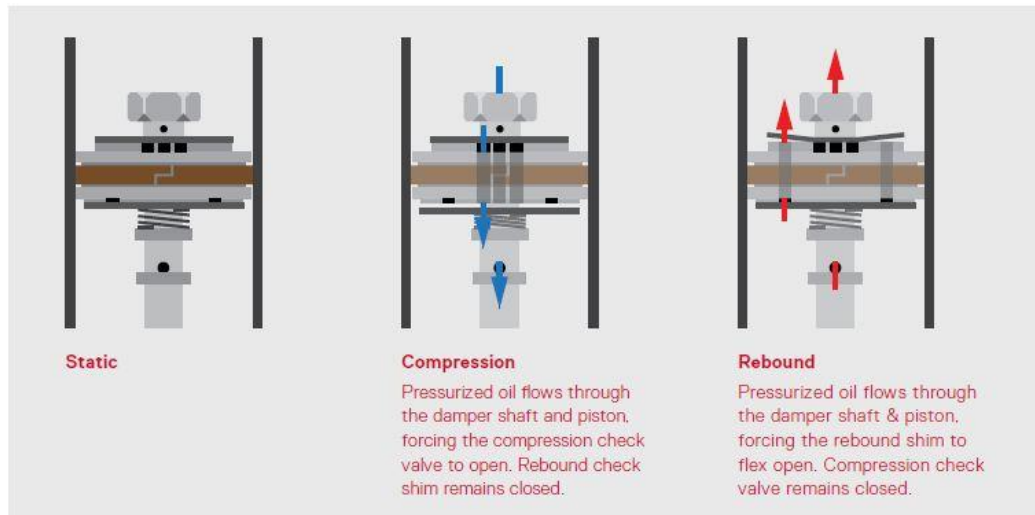


Figura 12. Válvula.



Figura 13. Dial de compresión.

Toda bicicleta de doble suspensión tiene asociada una cinemática propia y unas características que definen el comportamiento de la suspensión trasera ante factores como la pedalada, la frenada, estiramiento de la cadena o el ratio de palanca. Todo ello viene dado según la posición de las articulaciones y la longitud de las barras articuladas [4]. Expliquemos pues que son las características nombradas.

Ratio de compresión

Representa la palanca que hace el chasis sobre el amortiguador al realizar una fuerza vertical en el eje de la rueda trasera. Lo llamativo es que este ratio no es constante sino que varía en función de la posición de compresión. Esto quiere decir que con la suspensión totalmente extendida podemos tener una palanca 3:1 y cuando hemos consumido la mitad del recorrido de suspensión la palanca sea 2:1. En la representación **figura 14** es equivalente a decir que el punto de apoyo se va a desplazar causando que las distancias D1 y D2 varíen durante la absorción de un bache.

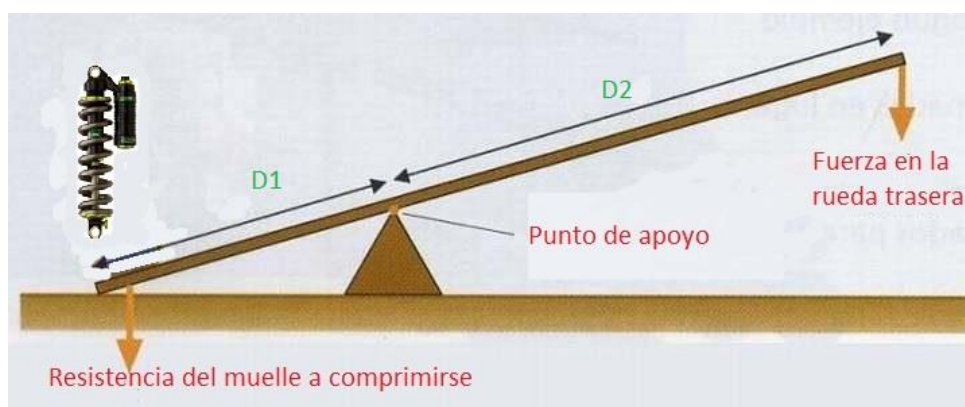


Figura 14. Ilustración de una palanca.

Esto nos da a lugar a sistemas de suspensión progresivos si disminuye el ratio de compresión, sistemas lineales si la variación del ratio es despreciable y sistemas regresivos cuando aumenta el ratio. Progresividad implica que la suspensión según aprovecha el recorrido se comporta más firme y regresividad lo opuesto. Esto es característico del chasis, habría que examinar el comportamiento del amortiguador para tener la suspensión completamente caracterizada.

Eficacia de pedaleo o Anti-squat

Representa si el sistema de suspensión se comprime, no se altera o se estira bajo la tensión de la cadena causada al pedalear. No debe confundirse con el bote causado al pedalear en posición erguida, estamos valorando la tensión que hace la cadena. Se debe hacer un análisis cinemática, hallando el centro instantáneo de rotación de la suspensión trasera. Para obtener una eficacia de pedaleo la suspensión no debe comprimirse ya que estaríamos desaprovechando energía útil para el avance.

Eficacia de frenada o Brake-squat

El freno trasero se ancla una barra móvil que forma parte del sistema de palancas de la suspensión trasera. De esta forma al frenar se introducen nuevas fuerzas en la dinámica del chasis provocando compresión o extensión de la suspensión. El objetivo es que sea lo más independiente posible porque en descenso es muy habitual frenar sobre baches o piedras y si la suspensión no absorbe por estar en proceso de frenado es un problema. Para ello se puede modificar el diseño del chasis o incorporar un adaptador flotante para que el freno quede totalmente independiente de la suspensión.

Estiramiento de la cadena o Pedal Kickback

La cadena es un elemento transmisor de la fuerza motriz ejercida en los pedales. Engrana en los platos y piñones y utiliza un desviador para cambiar de marcha. El hundimiento de la suspensión trasera causa un movimiento en la rueda trasera, que normalmente es circular, lo que lleva a que la rueda se aleje de los platos provocando que la cadena se “estire”. En realidad lo que sucede es que la cadena crea tensión y ocasiona que los piñones avancen en falso cuando la bicicleta esta en movimiento. El estiramiento se mide en grados y nos indica el movimiento de retroceso que harían los platos si la bicicleta estuviese parada.

En descenso las características más buscadas son un ratio progresivo y una frenada independiente aunque las marcas persiguen aunar todo.

Relacionado con las características de una bicicleta doble suspensión, existe una clasificación de tipos de chasis de bicicleta aunque nosotros no vamos a profundizar solo veremos los ejemplos siguientes.

Sistema mono-pivote

Es una bicicleta cuyo chasis solo tiene una articulación, es decir, un punto de giro que se comporta como centro instantáneo de rotación. Por lo general este sistema tiene un ratio de compresión lineal por ello a veces se usan bieletas adicionales para hacerlo progresivo. Su eficacia de pedaleo es alta y las fuerzas de frenada causan que se endurezca la suspensión notablemente. La figura *figura15* es un ejemplo de este tipo de bicicleta.



Figura 15. Sistema monopivote.

Sistema Pivote Virtual

Es un sistema en el cual la rueda trasera es solidaria a un basculante trasero que se une al chasis delantero mediante dos bieletas, dando como resultado 4 puntos de giro. Se consigue una eficacia de pedaleo alta y un ratio progresivo. Como contrapartida las fuerzas de frenada afectan notablemente. Un ejemplo de ellos es la siguiente ilustración *figura 16.*

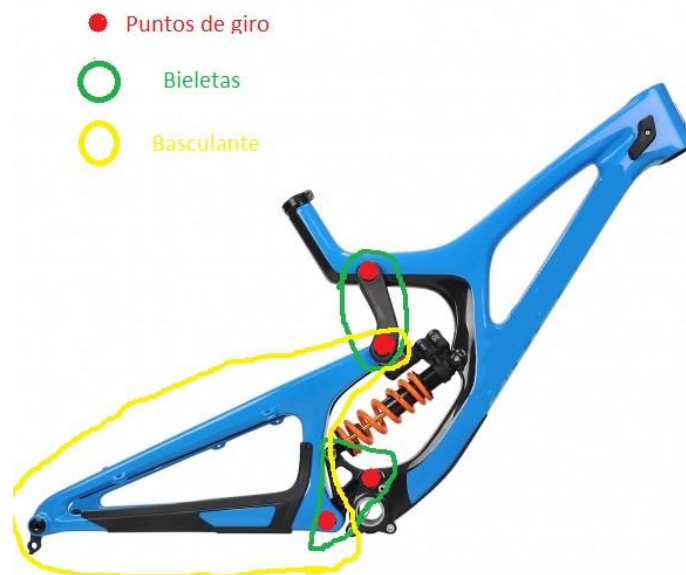


Figura 16. Sistema pivote virtual.

La suspensión delantera de una bicicleta de descenso es diferente a las suspensiones utilizadas en otras modalidades. Debido a su recorrido gran recorrido de 20 cm, el chasis de la suspensión utiliza un diseño que reparte el momento causado por las fuerzas del terreno. Este diseño es llamado doble pletina y las diferencias con respecto a una horquilla simple pletina se pueden apreciar en la figura *figura17*.



Figura 17. Doble pletina vs simple pletina.

2.2 Sistemas electrónicos de instrumentación en bicicletas de descenso

2.2.1 Telemetría profesional

En la modalidad de descenso se alcanzan velocidades elevadas lo cual lleva a que cualquier evento suceda muy rápido. Por ello cuando se necesita evaluar un nuevo modelo de bicicleta, una variación en la geometría del chasis o simplemente para comprobar el funcionamiento y reglajes de la suspensión se utiliza la electrónica para adquirir datos combinados con las sensaciones del piloto, su “*feedback*”. El sistema electrónico implementado utiliza sensores de posición y velocidad, acelerómetros, sensores ópticos o magnéticos, sensor de temperatura, GPS y una unidad encargada de registrar los datos [5].

Los sensores de posición y velocidad se colocan solidarios a las suspensiones de la bicicleta de forma que el recorrido y velocidad de compresión sean idénticos a ella. Existen dos tipos posibles, sensores potenciométricos lineales o sensores LVDT.

Los acelerómetros se sitúan en la parte rígida del chasis siendo la propia unidad central el lugar más común. Registran aceleración en los 3 ejes.

Los sensores ópticos o magnéticos se usan para medir la velocidad a la que se desplaza la bicicleta. Para ello se colocan cerca de la rueda o del disco de freno. Ello también nos aporta información del bloqueo de la rueda al frenar.

El sensor de temperatura nos informa de la temperatura alcanzada en la suspensión trasera normalmente. Esto nos es un indicador de la cantidad de energía disipada hidráulicamente.

No se dispone de gran información del sistema electrónico a bordo pero al fin y al cabo conocidos los posibles elementos solo se precisa almacenar los datos para su posterior análisis. Unas fotografías del sistema telemétrico son las siguientes ***figura 18, figura 19:***



Figura 18. Sistema telemetría [5].

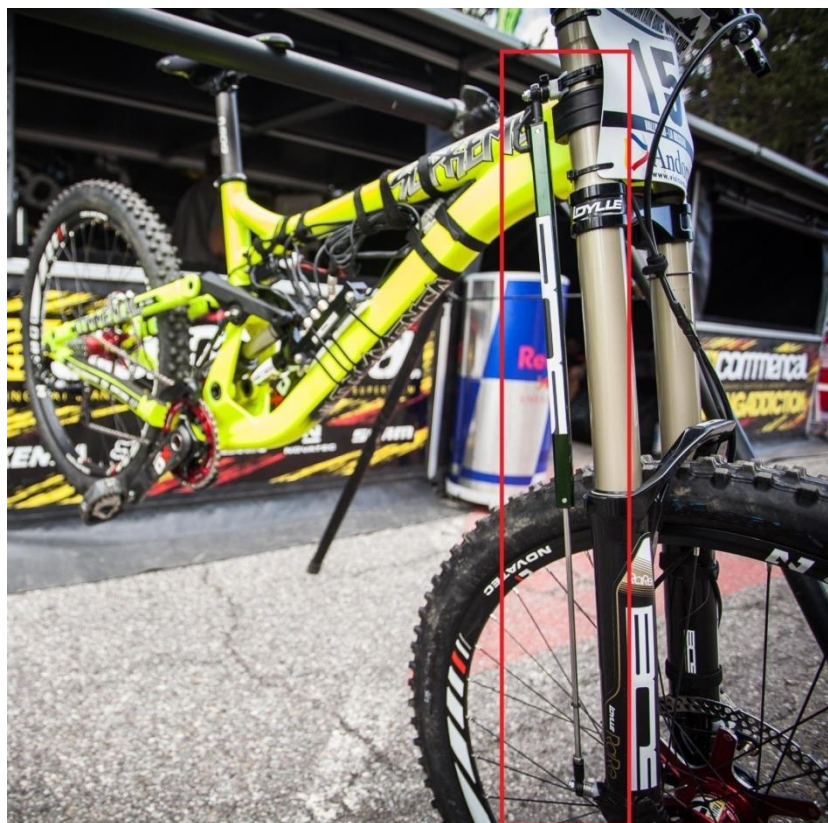


Figura 19. Sensor desplazamiento suspensión [5].

2.2.2 Telemetría comercial

Paray'sbike data logger

Es un sistema de telemetría completo y muy similar al que usan los profesionales. Posee un software propio en el cual se muestran los datos recogidos de forma intuitiva y visual [6]. Incluye los siguientes elementos:

- 2 sensores de desplazamiento para las suspensiones
- 2 sensores de velocidad para las ruedas
- Acelerómetro 3 ejes
- Unidad de recogida de datos
- Cables de conexión
- Soportes montaje
- Pc software

Además de la telemetría permite la sincronización de los datos con el video grabado a lo largo del recorrido lo que permite una observación muy directa.

El coste del equipo completo asciende a 2500\$.

Picorico-telemetry

Es un sistema alternativo al tradicional que usa sensores de desplazamiento resistivos o inductivos de gran tamaño. Estos sensores han sido sustituidos por *encoder* retráctil a través de un muelle de forma que cuando la suspensión se comprime el encoder gira siguiendo el movimiento. Usan también sensores ópticos en los discos de freno y una IMU con 9 grados de libertad [7].

La unidad central es un Arduino y estamos ante una plataforma abierta. La finalidad es que compremos o fabriquemos nuestros sensores y usemos la programación de Arduino que nos proporcionan gratuitamente los desarrolladores. Presenta un problema y es que no hay gran información al respecto y que finalmente el usuario debe tener ciertos conocimientos y habilidades para armar el sistema completo.

J-techsuspension

Es un sistema igual que el que usan los pilotos profesionales. Lo que se ofrece al usuario en este caso es el servicio de ajuste de suspensiones en un terreno elegido por el ciclista. El precio es £170 cada día de servicio y no incluye desplazamientos mayores a 40 millas de la empresa J-TECH [8].

Kinovea

Se trata de un programa gratuito que permite realizar análisis y estudiar la cinemática del movimiento. Para ello solo necesitamos grabar un video a una alta tasa de fotogramas, por los menos 120 fps. El enfoque debe ser perpendicular al movimiento que

queramos estudiar. Se consigue un seguimiento de posición y velocidad del elemento elegido en nuestro caso la suspensión. El inconveniente es que en algunos modelos de bicicleta resulta imposible grabar en perpendicular el amortiguador trasero [9].

Sussmybike

Es un simple sensor que recoge la velocidad y posición de nuestra suspensión y se comunica con nuestro teléfono móvil a través de Bluetooth. Consiste en un cable retráctil muy similar al sistema Picorico. En el móvil necesitamos una aplicación específica que nos mostrará los datos y además nos recomendará ajustes necesarios para mejorar el rendimiento de la suspensión. Es un dispositivo fácil de instalar e intuitivo gracias a su aplicación en el móvil. Aún no está en venta pero su precio estimado es £169 la unidad envío no incluido [10].

Shockwiz

Es un dispositivo que se conecta a la válvula de presión de aire de nuestra suspensión y recoge datos relacionados con la presión. Cuenta con una aplicación de teléfono móvil que utiliza Bluetooth que permite una fácil la interacción. Mediante algoritmos es capaz de recomendarnos que reglajes mejorar. El inconveniente es que para las suspensiones que usan muelle no es compatible. Recientemente el proyecto Shockwiz fue adquirido por SRAM. Su precio ronda los 399\$ [11].

2.2.3 Alternativas

El descenso es una disciplina en la que se requieren habilidades como equilibrio, fuerza, resistencia y agilidad. Para ir rápido además se necesita confianza y seguridad en uno mismo y en la bicicleta. Estas cualidades se alcanzan cuando nos encontramos cómodos y conocemos el comportamiento y límites de nuestra bici. Para ello un elemento muy importante son las suspensiones. Sus reglajes deben ser precisos y aptos para los diferentes escenarios que el ciclista va a enfrentarse durante su recorrido.

Los aficionados no estamos respaldados por un equipo profesional de mecánicos que nos ayuden con el problema que supone adaptar la bicicleta a un terreno concreto. Uno mismo es el que se enfrenta a ello.

El objetivo es diseñar, programar e implementar un sistema que no sea una copia de lo que ya hay en el mercado y que sea una opción alternativa. Dicho sistema se basa en acelerómetros, uno colocado en la parte móvil de la suspensión conocida como botellas de la horquilla y otro en la parte fija de la suspensión llamada barras. Al situarlos así conseguimos evaluar por una parte los impactos que recibe una bicicleta algo con posible interés pero lo realmente atractivo es comparar como es el impacto donde la suspensión aún no ha actuado, las botellas, y el impacto después de que la suspensión halla disipado la energía. Con ello podremos evaluar como la suspensión absorbe los impactos y como devuelve la energía que ha almacenado. En la suspensión trasera se montan acelerómetros también uno cercano al eje de la rueda trasera que es lo equivalente a las botellas de la horquilla y otro fuera del sistema articulado del cuadro emplazado cerca del sillín. La

situación de los acelerómetros se puede apreciar mejor en la ilustración siguiente, *figura 20*:



Figura 20. Posición acelerómetros del sistema.

2.3 Introducción a los acelerómetros

El sistema electrónico de instrumentación que se va a diseñar en este Trabajo Fin de Grado consta de cuatro acelerómetros mediante los cuales registramos datos que permiten estudiar el comportamiento de las suspensiones de la bicicleta.

Un acelerómetro es un dispositivo que transforma la aceleración en otra magnitud de salida normalmente eléctrica aunque depende de la tecnología del sensor y si posee instrumentación que acondicione la señal o no. Este tipo de sensores está limitado por el ancho de banda de frecuencias y amplitud máxima de aceleración que es capaz de registrar.

2.3.1 Características de un acelerómetro

Sensibilidad

Es la característica propia que nos expresa la proporción en la que la señal de salida cambia ante una variación en la señal de entrada. Sus unidades nos indican que tipo de variable de salida nos proporciona el sensor ante una entrada con una unidad concreta. De manera que una sensibilidad de $100 \text{ [mV/m/s}^2\text{]}$ nos indica que si el sensor sufre 1 m/s^2 de aceleración la salida es 100 mV .

Realmente la sensibilidad no es constante a lo largo de todo el rango de medida del acelerómetro. La desviación con respecto a la recta cuya pendiente es la sensibilidad se llama linealidad del sensor.

Ancho de banda

Es el rango de frecuencias en el que la sensibilidad es el valor especificado por el fabricante dentro de una variación posible definida por un porcentaje, es decir, el rango de frecuencias donde la sensibilidad se puede considerar constante.

Rango de medida o fondo de escala

El fondo de escala del acelerómetro es la aceleración máxima que es capaz de medir de forma fiable.

No linealidad

Es la desviación máxima que hay entre la respuesta lineal del sensor y la respuesta real.

Escala

En algunos acelerómetros existe la posibilidad de cambiar la sensibilidad. Esto nos permite que si el fondo de escala de nuestro sensor es elevado y vamos a medir pequeñas aceleraciones podemos cambiar la sensibilidad y obtener medidas precisas.

2.3.2 Tipos de acelerómetros

Existen muchos tipos de acelerómetros pero todos ellos tienen una cosa en común. Todos se fundamentan en la segunda ley de Newton **(9)**.

$$F = m \times a \quad (9)$$

F= fuerza

m= masa

a= aceleración

El dispositivo es sometido a una aceleración en el eje de medida causando que una masa conocida provoque una fuerza de compresión o tracción. Dicha fuerza es recogida por el sensor y es proporcional a la masa y a la aceleración. La masa es conocida por lo que podemos obtener el valor de aceleración absoluto.

Los acelerómetros pueden medir en uno, dos o tres ejes, son conocidos como uniaxial, biaxial, triaxial.

Piezoresistivos

Son sensores que transforman la deformación mecánica en una variación en la resistencia. Son sensibles a la compresión o tracción de forma que si se produce un cambio en la longitud hilo metálico esté varía su resistencia [12]. La siguiente ecuación expresa la resistencia del hilo **(10)**.

$$R = \frac{\rho \times l}{A} \quad (10)$$

R= resistencia eléctrica
 ρ = resistividad eléctrica del material
 l= longitud del hilo
 A= sección del hilo

Un ejemplo de este tipo de sensores son las galgas extensiométricas que a través de la Ley de Hooke (11), (12) y la segunda Ley de Newton (9) nos determinan la aceleración.

$$F = E \times \varepsilon \quad (11)$$

E= módulo de Young del material
 ε = elongación unitaria
 F= fuerza

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (12)$$

Δl = variación de longitud
 l_0 = longitud en reposo
 ε = elongación unitaria

Una imagen del empleo de galgas como acelerómetro es la mostrada a continuación [12] **figura 21**:

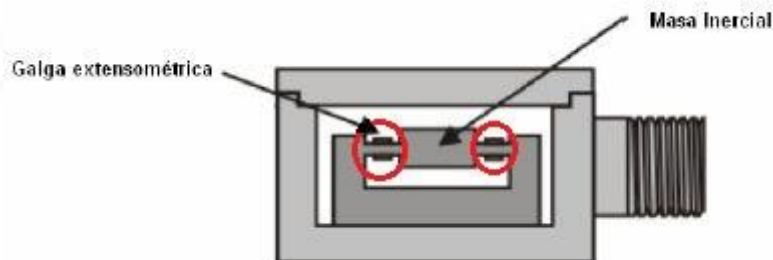


Figura 21. Colocación de galgas extensiométricas en un acelerómetro.

Piezoeléctricos

Son dispositivos compuestos por un cristal en el cuál al aplicarle una fuerza se desplazan las cargas eléctricas a las caras del propio cristal formando dos “polos”. En una

cara se sitúan las cargas positivas y en la otra las cargas negativas lo que genera una diferencia de potencial proporcional a la fuerza aplicada. No sirven para medidas de carga estática ya que si la fuerza es constante las cargas se equilibran [12]. Una ilustración sobre el fenómeno piezoeléctrico es la figura *figura22*.

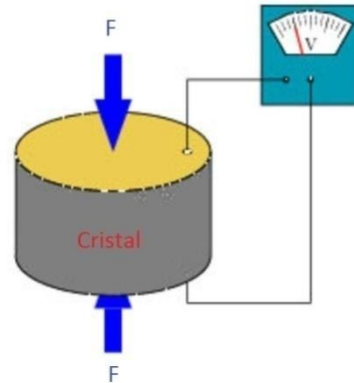


Figura 22. Fenómeno piezoeléctrico.

Capacitivos

Son sensores basados en el funcionamiento de un condensador. Al aplicar una fuerza provoca un cambio en la capacitancia. Un condensador está formado por dos placas de un área determinada y un dieléctrico entre ellas.

La capacitancia depende del área de las placas, del dieléctrico usado y de la separación entre las placas de forma que si sometemos el dispositivo a una aceleración, cambia la separación entre las placas que a su vez cambia la capacitancia de forma proporcional al esfuerzo aplicado [12]. Esta relación la define la ecuación (13).

$$C = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r \times \frac{A}{d} \quad (13)$$

C= capacitancia

ε_0 = permitividad del vacío

ε_r = permitividad del dieléctrico

A= Área efectiva de las placas

d= separación entre las placas

Típicamente se usa la tecnología de condensador diferencial, cuya representación se puede ver en la siguiente ilustración, *figura 23*:

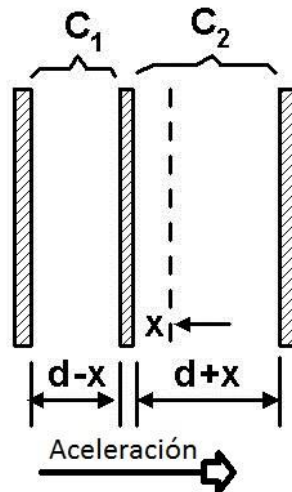


Figura 23. Condensador diferencial.

2.3.3 Instrumentación electrónica del acelerómetro.

Los diferentes tipos de acelerómetros vistos en el apartado anterior necesitan electrónica adicional para poder realizar medidas de aceleración. Un ejemplo de ello son los sensores piezoresistivos como las galgas que necesitan alimentación externa y un circuito electrónico, el más común para ello es el puente Wheatstone, para mejorar y amplificar la sensibilidad. En el caso de los piezoelectricos es necesario un amplificador de carga que acondicione la señal para poder obtener la medida de potencial generado en el cristal. Por último, si nuestro acelerómetro es capacitivo se requiere un circuito electrónico que habitualmente es una configuración en puente Wheatstone alimentado con corriente alterna para poder observar variaciones de capacitancia [12].

2.3.4 Tecnología MEMS

El significado de las siglas es Sistemas-Micro-Electro-Mecánicos. Se define como dispositivos electro-mecánicos de tamaño diminuto. Dicho tamaño abarca un rango que va desde un micrómetro a milímetros. Están formados por componentes activos y pasivos que son capaces de percibir, procesar de datos, comunicarse y actuar. El desarrollo de los semiconductores permite que se fabriquen circuitos integrados en tres dimensiones y con partes móviles. Los MEMS pueden fabricarse de diversas formas y materiales como por ejemplo Silicio, polímeros y metales [13].

2.3.5 IMU

Una unidad de medición inercial se compone de acelerómetros y giróscopos. Un giróscopo es un sensor que registra la orientación usando los fundamentos de la teoría de

la conservación del momento angular. Ambos sensores están fabricados con tecnología MEMS para conseguir un tamaño reducido de la unidad. Gracias a estos sensores el dispositivo es capaz de definirnos el movimiento y la orientación. El mínimo requerido es un acelerómetro y un giróscopo pero lo habitual es usar tres de cada elemento para poder seguir el movimiento de forma precisa [14].

Algunos modelos de IMU cuentan con un microprocesador el cual mediante el uso de un conversor analógico-digital transforma la salida de los sensores a señales digitales. Los datos pueden ser procesados incluso almacenados en pequeños registros los cuales pueden ser leídos por el usuario.

Estos dispositivos son usados en aeronáutica, satélites, transporte marítimo y en la robótica.

A continuación en el capítulo posterior se diseña y detalla el sistema de instrumentación para la monitorización de las suspensiones en una bicicleta de descenso.

Capítulo 3 Diseño del sistema de instrumentación a bordo

En este capítulo se detallan los dispositivos que forman el sistema de instrumentación conformes al entorno que supone una bicicleta de descenso.

En el descenso la bicicleta, el piloto y el sistema de adquisición de datos montado a bordo soportan grandes agitaciones, vibraciones y agentes meteorológicos externos.

Nuestro sistema electrónico no está preparado contra los agentes externos como la lluvia puesto que es un prototipo con el fin de realizar pruebas seguras.

3.1 Descripción del sistema propuesto

3.1.1 Diagrama de bloques

El sistema electrónico de adquisición de datos se expone mediante un esquema ilustrativo, *figura 24*.

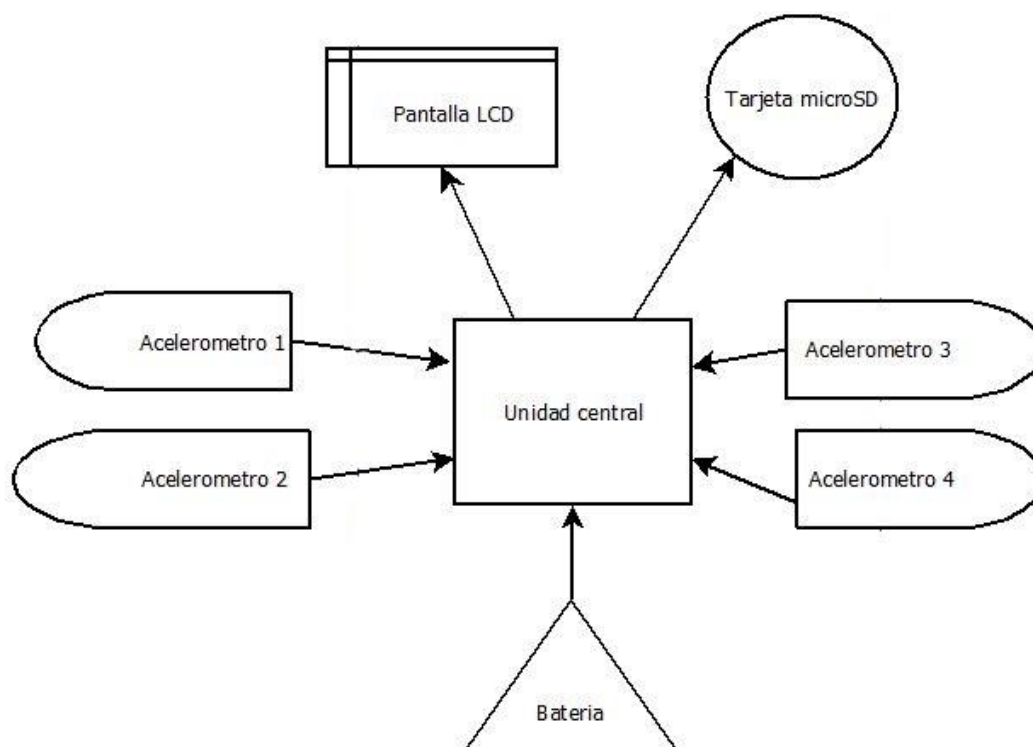


Figura 24. Diagrama del sistema.

El sistema cuenta con una unidad central que gestiona todos los datos recogidos por los acelerómetros, disponemos de cuatro estos, dos de ellos para la suspensión delantera y otros dos para la suspensión trasera. Para registrar los datos y poder exportarlos a un ordenador para su análisis posterior el sistema posee un subsistema de tarjeta microSD en la cual se guardan los datos. Además, disponemos de una pantalla LCD para comprobar que el sistema funciona correctamente antes de que comience la toma de datos. Esto es necesario ya que al sufrir grandes agitaciones alguna soldadura o cable puede deteriorarse y dejar de funcionar, a través de la pantalla se logra observar estos fallos. Por último, como todo sistema portátil, se usa una batería que proporciona alimentación para todo el sistema.

3.1.2 Especificaciones

El terreno causa en la bicicleta diferentes aceleraciones. Pueden ser de dos tipos, consecutivas como las causadas en una zona de baches o piedras o aceleraciones repentinas de gran amplitud como las ocasionadas en un salto. Es difícil acotar el rango de aceleraciones en el que el sistema debe ser capaz de captar datos para ello usaremos un poco de Física [15].

Suponemos que se realiza un salto de 2 m de altura y la caída no está preparada, es decir, se produce en el suelo y en horizontal para que no haya ningún tipo de transición. Un dibujo de ello se observa en la imagen *figura 25*.

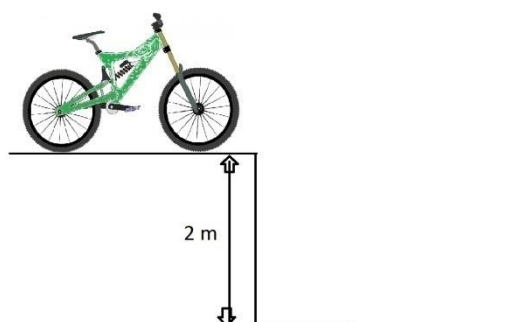


Figura 25. Esquema del salto.

El ciclista pesa 70kg y la bicicleta pesa 20 kg. El aterrizaje se realiza con las dos ruedas al mismo tiempo. Suponemos que se aprovecha todo el recorrido de suspensión que en caso de una bicicleta de descenso es 20 cm en ambas suspensiones y que el centro de gravedad del ciclista baja 20 cm, es decir, el impacto hace que las articulaciones del cuerpo flexionen y también absorben energía.

El análisis del problema empieza por hallar la velocidad vertical con la que la chocara con el suelo para ello usamos el teorema de conservación de la energía y podemos afirmar que la energía potencial que se posee por estar a la altura de 2 m será igual a la energía cinética cuando la bicicleta toque el suelo. Esto se expresa en la ecuación (14).

$$m \times g \times h = \frac{1}{2} \times m \times v_i^2 \quad (14)$$

m= masa

g= aceleración de la gravedad

h= altura

v_i = velocidad impacto con el suelo

De forma que la velocidad al chocar con el suelo viene dada por la expresión (15).

$$v_i = \sqrt{2 \times g \times h} \quad (15)$$

Sustituyendo los valores del enunciado obtenemos que la velocidad es 6.26 m/s. Calculamos ahora la velocidad media de detención para ello conociendo que al final del todo la velocidad vertical es 0 m/s, sumamos las velocidades y dividimos entre 2 obteniendo $v_m = 3.13$ m/s.

El espacio que tiene la bicicleta para detenerse es su suspensión y lo que absorba las articulaciones del piloto, en nuestro caso son 20 cm y otros 20 cm. Ello sumado nos da 40 cm. Con esto podemos calcular el tiempo de detención usando la ecuación (16).

$$\Delta t = \frac{d}{v_{media}} \quad (16)$$

d= distancia de detención

Usando los valores obtenidos anteriormente obtenemos un tiempo de 0.127 s. Ya solo nos queda hallar la aceleración media del impacto. Realmente no necesitamos calcular la fuerza. Utilizamos la siguiente expresión (17).

$$a_m = \frac{v_i - v_f}{\Delta t} \quad (17)$$

a_m = aceleración media

v_f = velocidad final vertical que es 0 m/s

Obtenemos que la aceleración media es 49.29 m/s² que dividido en la aceleración de la gravedad 9.8 m/s² nos resulta las fuerzas G sufridas. El resultado es 5.02 G.

Como conclusión nuestro sistema electrónico tiene que ser capaz de medir 5 G pero sin olvidar que es una aceleración media por lo que una aceleración de pico suponiendo el doble del valor hallado debe poder medir 10 G.

Una vez acotado el posible rango de aceleraciones surge la duda de a qué frecuencia muestrear para poder registrar el movimiento de la suspensión de forma fiable. El sistema comercial “*Paray’sbike data logger*” nos proporciona una ayuda ya que observando su *datasheet* podemos ver que registra los datos a 100Hz. Aun así, decidimos hacer un test en el laboratorio para asegurarnos.

3.1.3 Caracterización con prueba de laboratorio

Se realiza un test para medir la señal de respuesta de la bicicleta ante un impacto. La prueba consiste en montar un acelerómetro capacitivo de referencia solidario a la parte baja de la suspensión delantera, es decir, en las botellas. Mediante el acondicionador de señal ajustamos la sensibilidad y la transformamos de uC/g a mV/g para poder trabajar con ella. Una vez hecho esto se utiliza un osciloscopio muestrea a su máxima velocidad de 100 MHz para asegurarnos de que captamos todo lo necesario. A continuación mediante un PC y el programa CleverScope realizamos el registro de datos.

El test consiste en levantar la rueda delantera del suelo y golpearla contra él bruscamente, sin estar montado en la bicicleta situado en un lado de ella. Las pruebas posibles se limitan por la conexión a través de los cables. Otra prueba realizada fue levantar la bicicleta con las dos manos y dejarla caer de forma que impacten las dos ruedas al mismo tiempo, la señal obtenida es similar a la obtenida golpeando solo la rueda delantera.

A continuación se muestran la señal registrada en el test realizado *figura 26*.

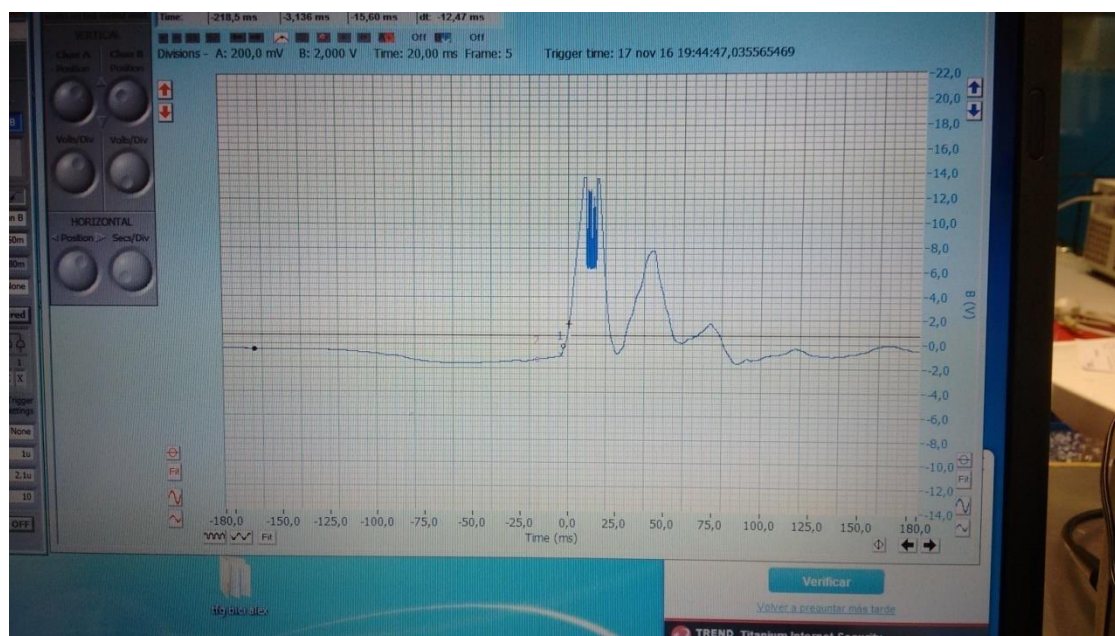


Figura 26. Señal obtenida.

Los resultados obtenidos muestran una señal cuyo periodo se aproxima a 32 ms. Esto quiere decir que estamos ante una señal cuya frecuencia es 30-40Hz. Al realizar el test con más fuerza cambiaba la amplitud de la señal pero la frecuencia era idéntica.

Con estos datos podemos establecer que nuestro sistema debe muestrear a una velocidad de 400Hz para poder tomar 10 muestras por periodo de señal.

Estos requisitos son muy importantes ya que acorde a ellos elegiremos los elementos del sistema.

3.2 Selección de acelerómetros

En el sistema se necesitan cuatro acelerómetros, dos para las zonas más expuestas de la bicicleta donde la suspensión aún no disminuido los impactos y dos en zonas a posteriori de la suspensión.

Se persigue conseguir un tipo de acelerómetro que sea pequeño, cumpla los requisitos del sistema y que sea barato. Para ello se opta por elegir dispositivos de tecnología MEMS y con acondicionamiento de señal incorporado que sea a la vez compatible con el micro-controlador usado que como veremos más adelante es Arduino.

Si el acelerómetro es analógico el factor limitante es las entradas analógicas de Arduino. Tienen un rango de 0-5 V en los modelos comunes y un rango de 0-3.3V en el Arduino Due.

En el caso de que el acelerómetro sea digital el factor limitante es el tipo de comunicación disponible. Normalmente transmiten los datos por I2C o SPI. En algunos casos usan modulación por ancho de pulso conocida como PWM.

Se contempla la posibilidad de uso de acelerómetros inalámbricos que mediante radio frecuencia se comuniquen con el micro-controlador pero se debe desechar esta opción debido al alto coste de los dispositivos y a su gran tamaño.

Una vez decantado por el uso de acelerómetros cableados hay dos posibles opciones: digital y analógico.

Un sensor digital es más robusto ya que su método de comunicación I2C o SPI trabaja con niveles TTL. Los niveles TTL, lógica transistor a transistor, permiten que ante pequeñas interferencias o caídas de potencial la comunicación sea segura. El '1' lógico representa un rango de tensión que va desde 2V a 5V. Por otra parte el '0' lógico simboliza un rango de tensión que va desde un 0V a 0.8V.

Protocolo I2C

En el protocolo de comunicación I2C la información se transmite bit a bit en grupos. Los dispositivos se pueden conectar en cualquier punto del cable. Está formado por 2 hilos: SCL y SDA. SCL es la señal de validación que es muy similar a una señal "clock". Para que haya comunicación, la señal de validación y la señal SDA deben cumplir unas circunstancias determinadas. El hilo SDA es el medio por el que se transmiten los datos, es bidireccional pero no permite la comunicación "full-duplex". Los datos se envían en tramas de 8 bit que comienzan con un bit "start" y terminan con un bit de parada "stop" [16]. Una representación de ello es la siguiente representación **figura 27:**

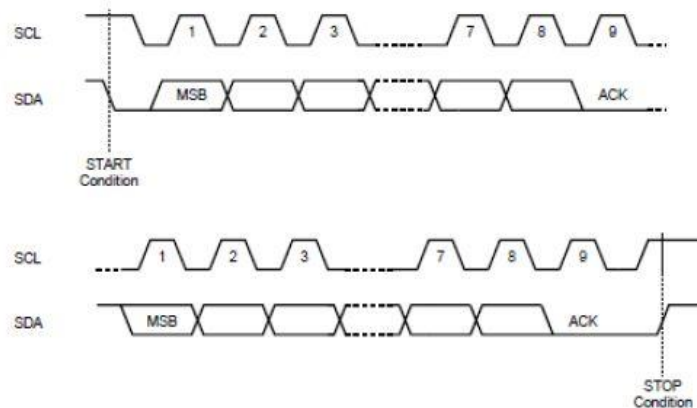
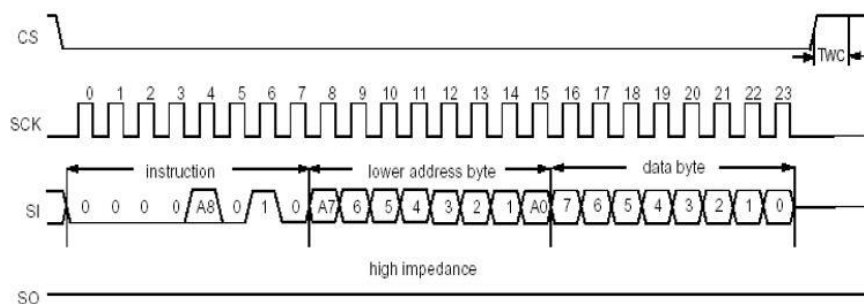


Figura 27. Comunicación I2C [16].

Protocolo SPI

La comunicación SPI necesita 4 hilos: SCK, MOSI, MISO y CS. La señal SCK es un reloj que al igual que en el protocolo I2C marca los tiempos en los que se envían los bits. A través de los hilos MOSI y MISO se transmiten los datos, el MISO es para la comunicación del esclavo hacia el maestro y el MOSI del maestro al esclavo. Gracias a estos hilos la transmisión es “full duplex”. El hilo CS se usa para la selección de dispositivo, es decir, activa la comunicación. Necesitamos un hilo de CS para cada elemento. Es un protocolo que consigue una velocidad de transmisión superior al I2C, no necesita “start” ni “stop” [16]. Como desventaja usa más hilos que el I2C. Una ilustración de cómo es el envío de datos es la siguiente **figura 28**:



WRITE instruction

Figura 28. Comunicación SPI [16].

El problema que presentan los protocolos I2C y SPI es la longitud de transmisión, si el dispositivo se encuentra muy lejos del micro-controlador la comunicación no es fiable. En nuestro caso el alojamiento del micro-controlador es el centro de la bicicleta y el sensor más alejado debe situarse a 80-90cm de éste. Por ello los acelerómetros digitales se descartan.

Un sensor analógico su salida es continua en el tiempo y de carácter eléctrico. Con la correcta forma de transmitir la señal se logran cubrir distancias de decenas de metros sin problemas. Para ello es necesario apantallar el cable de señal y que presente baja resistencia para evitar caídas de voltaje.

Para la elección de los sensores necesitamos centrarnos en aquellos que no requieren acondicionamiento extra para ser compatibles con Arduino y que cumplen con nuestros requisitos de fondo de escala 10 G y 400Hz de velocidad de muestreo. En nuestro sistema se necesitan sensores de aceleración en dos ejes pero comercialmente existen muy pocos modelos y no cumplen los requisitos. Por ello se opta por un acelerómetro triaxial. Veamos a continuación los posibles acelerómetros, ***tabla 1***.

Marca y modelo	Tipo	Sensibilidad	Fondo de escala	Alimentación	Ancho de banda	Salida
ADXL345	Digital	256 LSB/g a escala 2G 32 LSB/g a escala 16G	2/4/8/16 G	2-3.3V 140µA	6,25-3200Hz	I2C, SPI
LIS331HH	Digital	3 mg/digit a 6G 12 mg/digit a 24G	6/12/24 G	2,16-3,6V 250µA	0,1-1000Hz	I2C, SPI
MPU6050	Digital	16384LSb/g a escala 2G 2048LSb/g a escala 16G	2/4/8/16 G	2,37-3,46V 500µA	4-1000Hz	I2C
MMA7341L	Analógico	440 mV/g a escala 3G 117mV/g a escala 11G	3/11 G	2,2-3,6V 400µA	0-400Hz	Voltaje
ADXL345	Analógico	300 mV/g a escala 3G	3G	1,8-3,6V 350µA	0,5-1600Hz	Voltaje
MMA7361	Analógico	800 mV/g a escala 1,5G 200mV/g a escala 6G	1,5/6 G	2,2-3,6V 400µA	0-400Hz	Voltaje

Tabla 1. Acelerómetros valorados.

Recordamos las limitaciones a tener en cuenta para elegir sensor:

- Debe soportar 10G.
- Nuestro sistema es desconocido pero las frecuencias posibles no son altas podrían estar comprendidas entre 0-100Hz. Al realizar el test en el laboratorio obtuvimos una señal de 30-40Hz pero no es una prueba con garantía 100% ya que no es sobre el terreno.
- Los acelerómetros lejanos deben transmitir a 80-90cm de distancia y los cercanos a 20-30cm.
- Deben ser compatibles en transmisión y alimentación con Arduino.
- Bajo coste
- Tamaño reducido

Teniendo en cuenta todos los requisitos que nos hemos marcado la opción elegida consta de **dos acelerómetros digitales MPU6050 y dos acelerómetros analógicos MMA7341L**.

Anteriormente se explicó que los protocolos I2C y SPI están diseñados para distancias cortas cercanas al microprocesador por lo que es necesario el uso de sensores analógicos. Por ello y porque cumple el requisito de al menos $\pm 10G$ de rango se elige el sensor MMA7341L.

El sensor MPU6050 se opta por elegirlo debido a la versatilidad que ofrece un sensor digital frente a uno analógico. Del sistema se espera que tras la suspensión los 10G de aceleración posibles se hayan minimizado por lo que si utilizamos un sensor con múltiples escalas posibles podremos obtener una señal más precisa. El MPU6050 tiene una sensibilidad superior a los otros sensores valorados por todas estas razones es el candidato perfecto para este proyecto.

3.2.1 Características del sensor MMA7341L

Es un acelerómetro capacitivo fabricado con tecnología MEMS. Cuenta con un filtro paso bajo con 1 polo dominante, con “*SleepMode*” y con la posibilidad de elegir entre dos sensibilidades.

Especificaciones principales

- Alimentación 2.2-3.6V, consumo 400 μ A y 3 μ A en “*SleepMode*”.
- Fondo de escala ajustable a $\pm 3G$, $\pm 11G$.
- Sensibilidad 440mV/g a 3G y 117.8mV/g a 11G.
- Ancho de banda de 400Hz en el eje X, Y y 300Hz en el eje Z.
- Muestreo interno a 11kHz.
- “*Self test*”.
- Compensación de temperatura.
- Rango de temperatura $-40^{\circ}C$ a $85^{\circ}C$.
- No linealidad $\pm 1\%$ FSO.

Una ilustración del diagrama de bloques internos y del sensor son las siguientes, *figura 29, figura 30*:

3.2.2 Características del sensor MPU6050

Es un dispositivo que combina 3 acelerómetros, 3 giróscopos y un procesador de movimiento digital. Posee un conversor analógico-digital para cada eje con una resolución de 16 bits. Nos proporciona diferentes escalas tanto para los acelerómetros como para los giróscopos. Se comunica con otros dispositivos a través de I2C. Está fabricado con tecnología MEMS y CMOS.

Especificaciones principales

- Alimentación 2.375-3.46V.
- Consumo operacional 3.6mA el giróscopo y 500 μ A el acelerómetro.
- 16 bits de resolución.
- Fondo de escala del acelerómetro ajustable a $\pm 2G$, $\pm 4G$, $\pm 8G$, $\pm 16G$.
- Fondo de escala del giróscopo ajustable a $\pm 250^\circ/s$, $\pm 500^\circ/s$, $\pm 1000^\circ/s$, $\pm 2000^\circ/s$.
- Filtro paso bajo programable 5-260Hz.
- Memoria FIFO de 1024 byte.
- Sensor de temperatura externa.
- Sensibilidad 16384 LSB/g a 2G y 2048 LSB/g a 16G.
- Ratio de salida de datos programable 4-1000Hz.
- Rango de temperatura $-40^\circ C$ a $85^\circ C$.
- Bus auxiliar I2C para conectar otro dispositivo.
- No linealidad $\pm 0.5\%$.

Una ilustración del sensor y del diagrama de bloques internos son las siguientes, *figura 31, figura 32*:

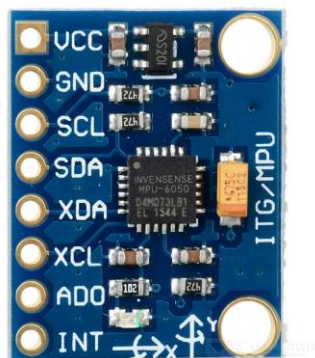


Figura 31. Sensor MPU6050.

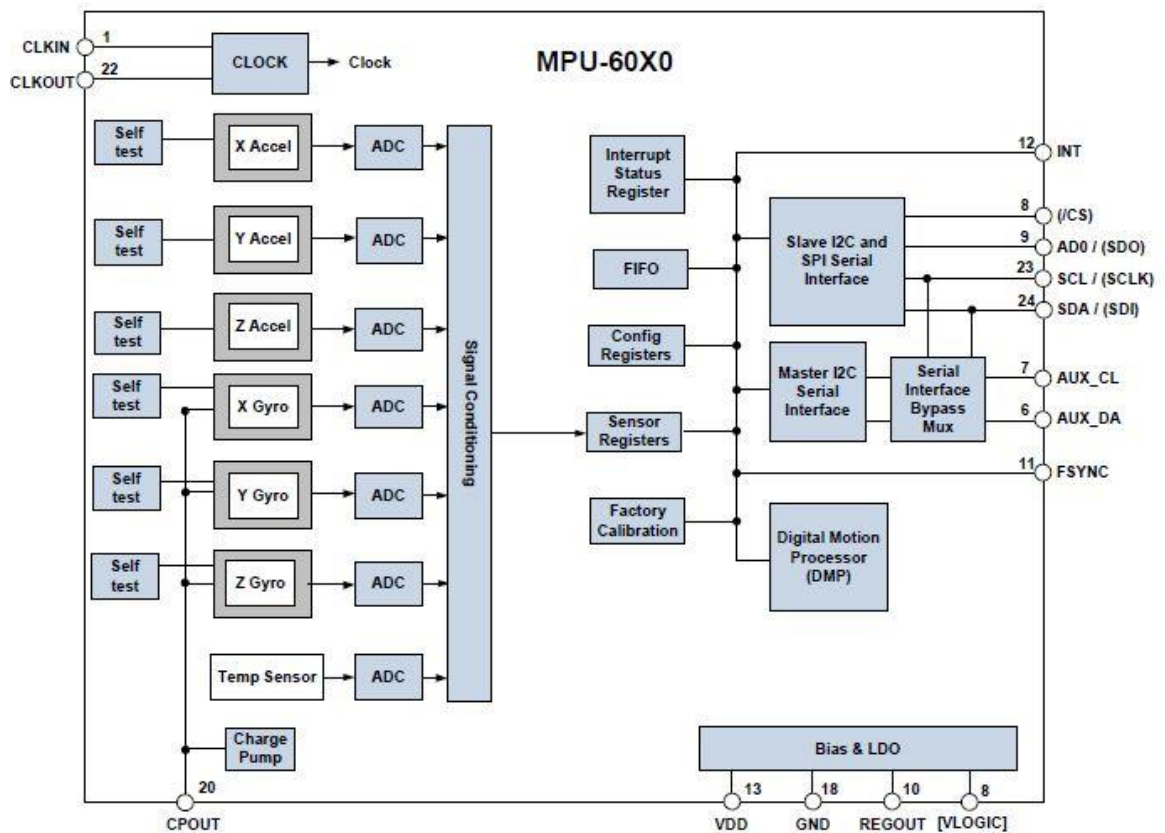


Figura 32. Diagrama de bloques internos MPU6050.

3.3 Selección del micro-controlador

3.3.1 Introducción

Es un circuito integrado programable que puede realizar diversas funciones según las ordenes grabadas en su memoria. Consta de tres bloques funcionales que son la Unidad Central de Procesamiento, la memoria y los periféricos de entrada/salida.

Se caracterizan por tener un tamaño reducido, bajo coste y bajo consumo. Su núcleo puede trabajar desde 4 bit en aplicaciones sencillas a 64 bit en sistemas más complejos [17].

Existen numerosos micro-controladores desarrollados por diferentes empresas como Intel, Atmel, Broadcom y Renesas. La mayoría de ellos permiten el uso del lenguaje de programación C.

Los posibles candidatos deben cumplir los siguientes requisitos:

- Tener entradas y salidas suficientes para integrar nuestro sistema: 4 entradas analógicas, bus I2C, bus SPI, etc.
- Tener disponibles salidas de tensión reguladas para alimentar los dispositivos.
- Bajo coste.
- Bajo consumo.
- Fácil programación.
- Utilizar un procesador lo suficientemente rápido para muestrear los acelerómetros a 400Hz.
- Tamaño reducido.

Se plantea el uso de Raspberry Pi, PIC o Arduino. Se descarta el uso de Raspberry Pi por la ausencia de entradas analógicas directas, por ser un sistema muy superior computacionalmente y por tener funciones que no se utilizarían como los gráficos u audio. El micro-controlador PIC se suprime como opción porque no se comercializa una versión con los periféricos necesarios para nuestro sistema, habría que adaptar periféricos al micro-controlador. Finalmente se opta por usar Arduino ya que cuenta con las entradas salidas necesarias, por su bajo coste y por la gran documentación existente.

3.3.2 Plataforma Arduino

Arduino es una plataforma abierta que facilita el uso de “*hardware*” y “*software*”. Fue creado para ser una herramienta rápida y practicable para realizar prototipos. Actualmente existen diferentes modelos para poder adaptarse a las necesidades de cada uno, desde un modelo de tamaño reducido y escasos periféricos como es el modelo Arduino Nano hasta un modelo más completo y veloz como es el Arduino Due [18].

El lenguaje de programación es propio basado en C y Wiring. El entorno de programación (IDE) se fundamenta en Processing y esta accesible gratuitamente en la página oficial de Arduino <http://arduino.cc/>.

Arduino es ideal para cualquier proyecto o aplicación por los siguientes motivos:

- Bajo coste.
- Lenguaje y entorno accesibles para nuevos usuarios.
- Es un recurso abierto.
- Existencia de foros y página propia.
- Alta compatibilidad.
- Disponibilidad de sensores y otros recursos específicos para uso con Arduino.

3.3.3 Características del Arduino Due

Una vez decididos a usar la plataforma Arduino debido a las ventajas nombradas anteriormente es el momento de concretar modelo. Para ello debe satisfacer las siguientes necesidades de nuestro sistema:

- Alcanzar una velocidad de muestreo de 400Hz.
- Alimentar todos los elementos sin necesidad de acondicionamiento extra.
- Tener los periféricos necesarios para el sistema.

Finalmente se opta por el uso de Arduino Due ya que es el único capaz de suministrar alimentación para los dispositivos del sistema. Otro motivo de su elección es su alta capacidad de procesamiento ya que el micro-controlador trabaja a 32 bits, en lugar de a 8 bits como los otros modelos disponibles. Su conversor analógico-digital cuenta con 12 bit de resolución lo cual es otro punto a su favor [18].

Características Arduino Due

Es la primera placa en trabajar con un núcleo ARM de 32 bits lo que supera a sus antecesores. Sus principales especificaciones son las siguientes:

- Micro-controlador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU a 32 bits.
- Velocidad del reloj 84 MHz.
- Memoria SRAM de 96KB.
- Memoria flash de 512 KB.
- Voltaje de trabajo 3.3V.
- Voltaje alimentación recomendado 7-12V.
- 12 entradas analógicas.
- 54 entradas/salidas digitales.
- Corriente máxima salida del pin 5 V de 800 mA.
- 2 salidas analógicas.
- 2 conexiones I2C.
- 1 conexión de comunicación SPI.

Esta versión de Arduino cuenta con dos botones, “*erase*” y “*reset*”. Con ellos conseguimos borrar la memoria flash eliminando el programa cargado del micro-controlador o reiniciar el programa que se ejecuta. Este modelo de Arduino se representa en la imagen de a continuación, **figura 33**:

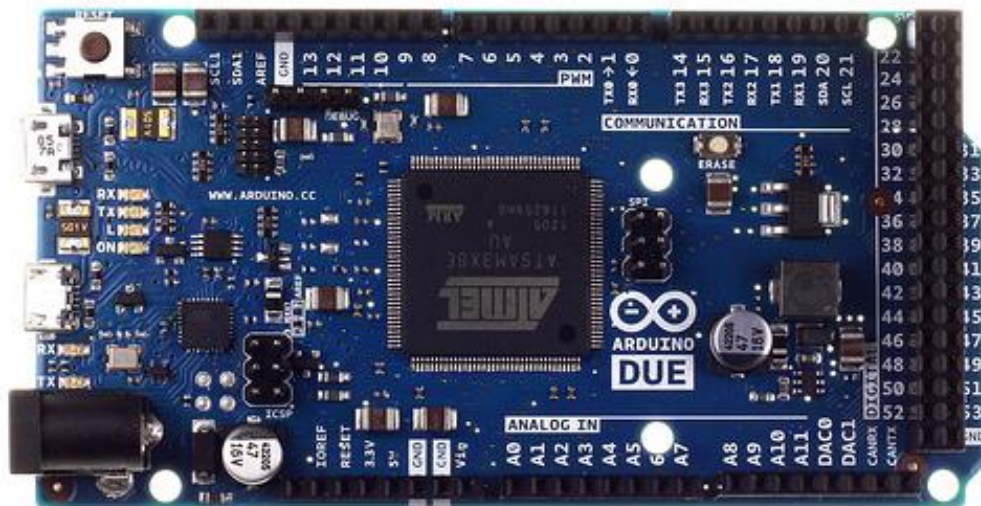


Figura 33. Arduino Due [18].

3.4 Dispositivos auxiliares

3.4.1 Batería

Todo sistema portable necesita una fuente de alimentación que también lo sea. Para ello se escoge una batería que alimente al Arduino Due y esté mediante reguladores de tensión internos alimenta los demás dispositivos.

Se opta por el uso de una batería externa para dispositivos portátiles ya que tienen alta capacidad, tamaño reducido, y bajo peso. Se pueden recargar fácilmente mediante conexión USB en un PC o con un adaptador de corriente de red.

El consumo total teórico de nuestro sistema es la suma de los consumos de cada elemento. Los dispositivos consumen aproximadamente 230mA y el propio Arduino consume 75mA. Esto nos da un total aproximado de 300mA.

Se elige una Woxter powerbank 2600 sr de 2600mAh y una descarga máxima de 1A. Nos ofrece una autonomía de 8.6h (2600mah/300ma). A continuación se muestra una ilustración de la batería, *figura 34*:



Figura 34. Batería Woxter powerbank 2600 sr.

3.4.2 Pantalla LCD HD44780

Es necesario que antes de ponernos manos a la obra y realizar un descenso con la esperanza de recoger datos comprobar que todo sigue en su sitio y que funciona correctamente. El sistema cuenta con una pantalla LCD en la cual se muestra el estado de los dispositivos, es decir, si responden adecuadamente o presentan algún fallo de conexión.

El modelo elegido es una pantalla LCD HD44780 16x2. Su tamaño es reducido, tiene regulación de contraste y cuenta con un módulo adaptador que nos permite comunicarnos a través de I2C. Se alimenta a 5V y tiene un consumo máximo de 25 mA. Una imagen de ello es la siguiente, *figura 35*:



Figura 35. LCD HD44780 y adaptador I2C.

3.4.3 Adaptador de tarjetas microSD

Nuestro sistema es capaz de recoger datos pero es necesario almacenarlos en algún dispositivo. Podría almacenarse en el propio Arduino pero la memoria disponible es limitada. Otro inconveniente sería que necesitamos conectarnos directamente con él y estaríamos limitados por un cable. Para mayor comodidad y ser prácticos los datos se guardan en una tarjeta microSD la cual se puede extraer fácilmente y tiene alta capacidad.

La tarjeta microSD que se usa no presenta prácticamente ninguna restricción puesto que las tarjetas de categoría inferior del mercado como son las de clase 2 son capaces de transferir datos a 2MB/s, velocidad muy superior a la necesaria para grabar muestras a 400Hz. Finalmente se usa una tarjeta microSD de 1GB.

Se utiliza un lector de tarjetas microSD con salida SPI. Tiene un regulador de tensión interno que nos permite alimentar en el rango de 4.5-5.5V. Presenta un consumo menor a 200mA. Una ilustración del adaptador es la siguiente figura, **figura 36**:



Figura 36. Adaptador tarjetas microSD.

En el siguiente capítulo se exponen las interfaces necesarias para integrar todos estos dispositivos electrónicos mediante Arduino Due. Además se detalla la calibración de los acelerómetros, la programación del micro-controlador y el diseño mecánico de los soportes para unir los sensores a la bicicleta

Capítulo 4 Implementación del sistema de instrumentación

En este capítulo se expone la implementación y el montaje de los diferentes dispositivos elegidos anteriormente. Se explican las diferentes interfaces entre los dispositivos y la puesta en marcha de los acelerómetros, es decir, la calibración. También se presenta un diagrama de flujo ilustrativo de la programación realizada. Por último se muestra la forma en la que los elementos del sistema se integran físicamente en la bicicleta.

A continuación empezamos explicando cómo se asocian los dispositivos del sistema.

4.1 Sistema electrónico implementado

El sistema de instrumentación encargado de la monitorización de las suspensiones se compone y se implementa de acuerdo al siguiente diagrama de bloques, *figura 37*.

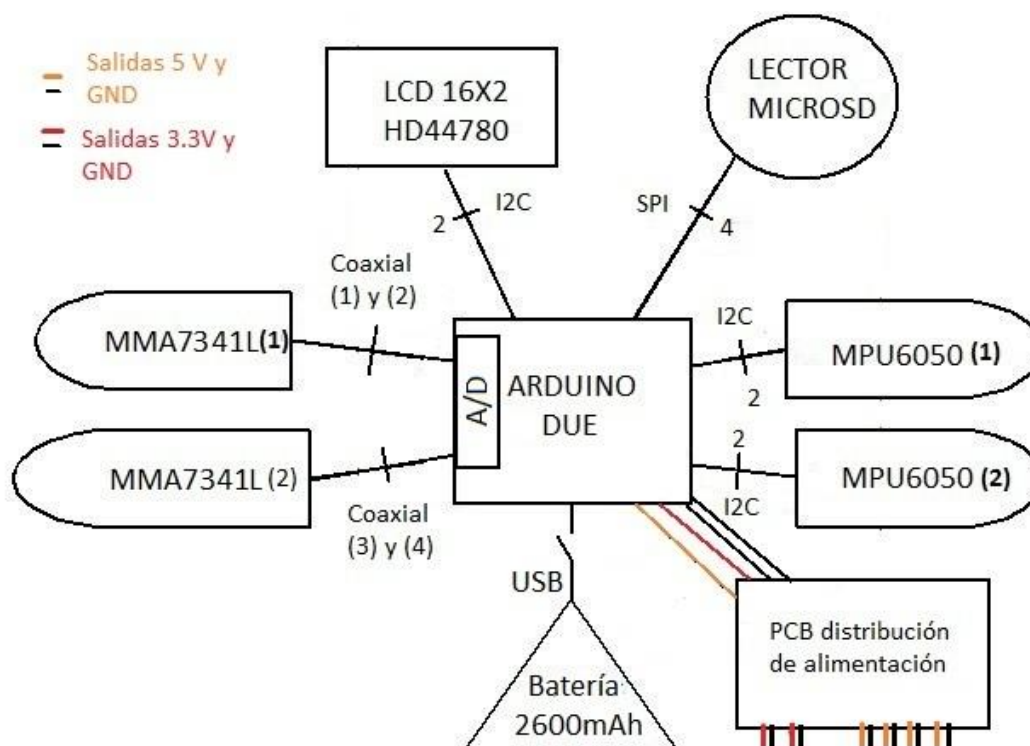


Figura 37. Diagrama de bloques en detalle del sistema implementado.

En el diagrama se observa que el sistema cuenta cuatro acelerómetros. Dos de ellos son analógicos y se conectan al Arduino mediante un conversor analógico-digital. Los otros acelerómetros son digitales y utilizan el protocolo I2C como interfaz. La pantalla LCD es otro de los dispositivos que se comunica a través de I2C y el módulo lector de microSD usa SPI. La batería externa proporciona la alimentación mediante cable USB y Arduino Due distribuye a todos los dispositivos a través de una PCB.

A continuación se detalla dispositivo a dispositivo cual es la implementación utilizada para asegurar su correcto funcionamiento.

4.1.1 Alimentación

El sistema consume teóricamente 300mA. Esto nos determina que la sección mínima del cable debe ser aproximadamente 0.13mm². El cable suministrado por el fabricante de nuestra batería garantiza que soporta 1A por lo que podemos enchufar la batería directamente al puerto microUSB de Arduino. Para mayor comodidad se intercala un conector On/Off cuadrado que nos permita apagar y encender el sistema.

Adicionalmente se implementa el uso de baterías LiPo a través del conector hembra de 2.1mm de Arduino. Se emplea un conector macho de 2.1mm con cable de 0.75mm² para prolongar los cables de la batería a través de un conector T-DEAN que permite la extracción de la batería para su carga o intercambio. El cable presenta dicha sección para aportar rigidez física y para ir acorde con el propio cable de la batería. En este caso también se intercala un conector On/Off para el encendido del sistema.

Unas imágenes de todos estos componentes son las expuestas a continuación, *figura 38, figura 39:*

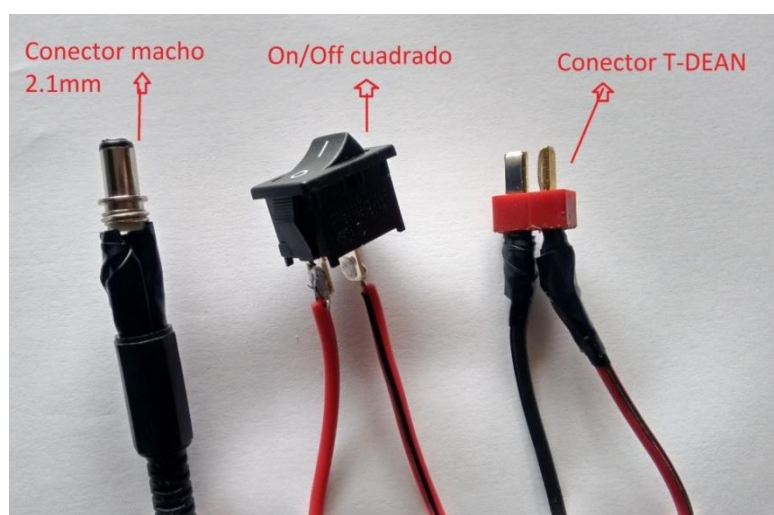


Figura 38. Conexión Arduino-batería LiPo.

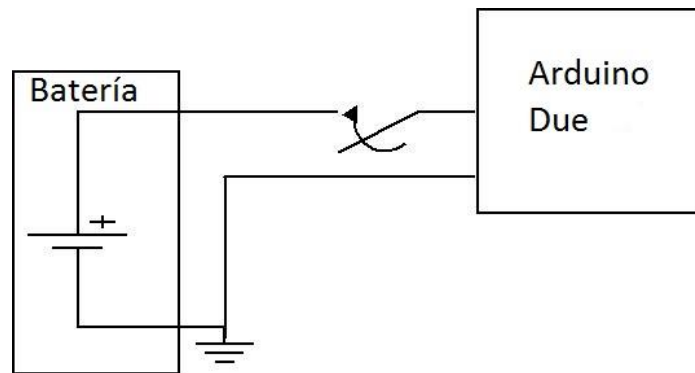


Figura 39. Esquema alimentación del sistema mediante batería.

4.1.2 Integración del sensor MPU6050

El acelerómetro MPU6050 posee como interfaz de comunicación de datos el protocolo I2C que se basa en dos hilos: SDA y SCL. El sensor es alimentado a través de Arduino a 5V y los demás pines no son usados. La conexión se realiza según la tabla, *tabla 2*.

MPU6050	ARDUINO
VCC	5V
GND	GND
SCL	PIN 21 SCL
SDA	PIN 20 SDA
XDA	NC
XCL	NC
AD0	NC/VCC
INT	NC

Tabla 2. Pines de conexión MPU6050 y Arduino Due.

Como podemos ver existen pines no conectados (NC) que no se usan ya que no se requieren sus funciones en este proyecto. Ellos son los pines auxiliares de I2C, diseñados para conectar otro dispositivo al propio sensor y administrar la comunicación, y el pin **int** que nos indica si se produce una interrupción programada.

El pin AD0 proporciona la dirección I2C al dispositivo 0x68 (hex) por defecto y si se conecta a VCC la dirección cambia a 0x69 algo necesario para el uso del segundo acelerómetro MPU6050 de nuestro sistema. Por lo que en uno de los sensores no está conectado y en el otro está a VCC. La escala se configura a +-8G mediante el uso de registros. Esto se detalla en el **Anexo 7: Programación Arduino Due**.

Los cables empleados para la conexión son conocidos como “*jumper wires*” para Arduino. Son cables de diferentes colores, con una sección aproximada de 0.20mm² que admiten hasta 600mA. En sus extremos cuentan con un conector cuadrado macho o hembra que permite una conexión rápida tanto con Arduino como con los dispositivos. Un ejemplo de estos cables es la siguiente figura, **figura 40**:



Figura 40. Cables de conexión jumper wires.

4.1.3 Integración del sensor MMA7341L

El sensor MMA7341L es un acelerómetro analógico y cada uno de los tres ejes nos genera una salida analógica. También cuenta con un pin para la realización de un test que comprueba el estado del sensor, otro pin que nos permite configurar el fondo de escala, otro pin que nos cede la posibilidad de poner el sensor en modo ahorro energético y una salida de detección de caída libre.

Nuestro sistema tiene que ser capaz de medir posibles aceleraciones de 10G, para conseguirlo conectamos el pin “g-select” a Vcc seleccionando así +-11G. No olvidemos que este sensor no acepta 5V, por lo que se conecta a 3.3V que es un voltaje en entra en su rango de alimentación permitido.

Finalmente conectamos los pines siguiendo las conexiones que aparecen en la tabla de abajo, **tabla 3**.

MMA7341L	ARDUINO
VCC	3.3V
GND	GND
GND	GND
X	A0
Y	A1
Z	A2
G-SELECT	3.3V
SELFTEST	GND
/SLEEP MODE	3.3V
0 G-DETECT	NC

Tabla 3. Pines de conexión MMA7341L y Arduino Due.

En nuestro sistema hay un segundo sensor idéntico, las conexiones son iguales con la variación de que las salidas de aceleración X, Y, Z se conectan a los pines A3, A4, A5 respectivamente.

El sensor analógico es el más expuesto a grandes agitaciones y sus cables deben poder aguantar agitaciones fuertes. Se determina que la mejor forma de transmitir las señales de salida del sensor es mediante cable apantallado coaxial SMA.

A continuación, para conectar el cable SMA con el acelerómetro se diseña una PCB en la cual se coloca un conector SMA de borde. Dicha PCB es doble cara, tiene un plano de masa en la cara superior y las conexiones en la cara inferior. Se usa el programa EAGLE PCB design en su versión gratuita disponible en su página web oficial.

A la hora de diseñar la PCB es necesario realizar medidas de nuestro sensor, situar los pines y crear un componente personalizado para poder incluirlo en el diseño. La distribución de los componentes se refleja en el siguiente esquema, **figura 41**:

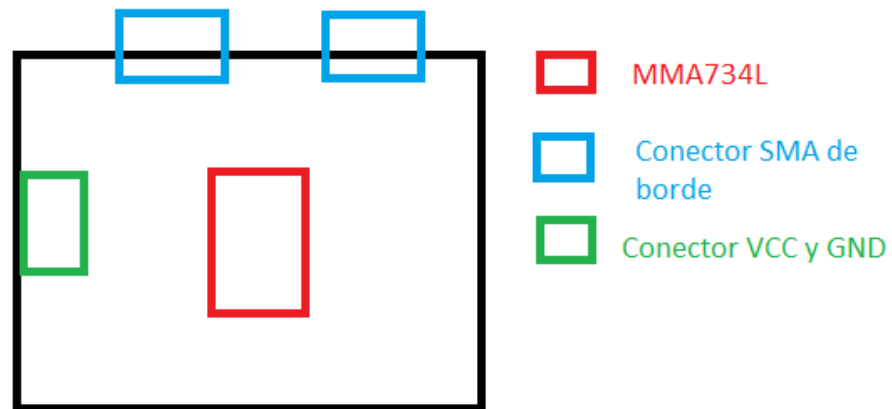


Figura 41. Esquema ilustrativo PCB del sensor MMA7141L.

Se usa solo dos conectores SMA porque en nuestro sistema solo se usan dos ejes, el eje X y el eje Y.

En las siguientes imágenes, *figura 42*, *figura 43*, *figura 44*, *figura 45* se muestra el *layout* del diseño y la PCB finalizada.

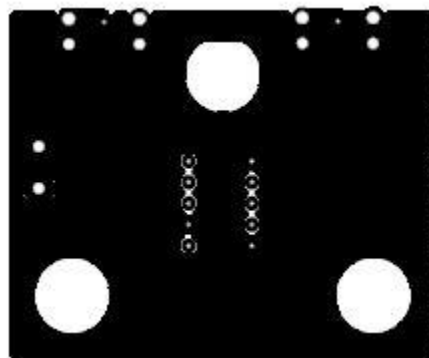


Figura 42. Layout top MMA7341L.

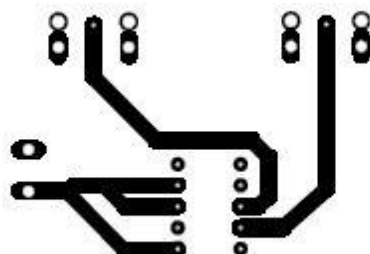


Figura 43. Layout bottom MMA7341L.

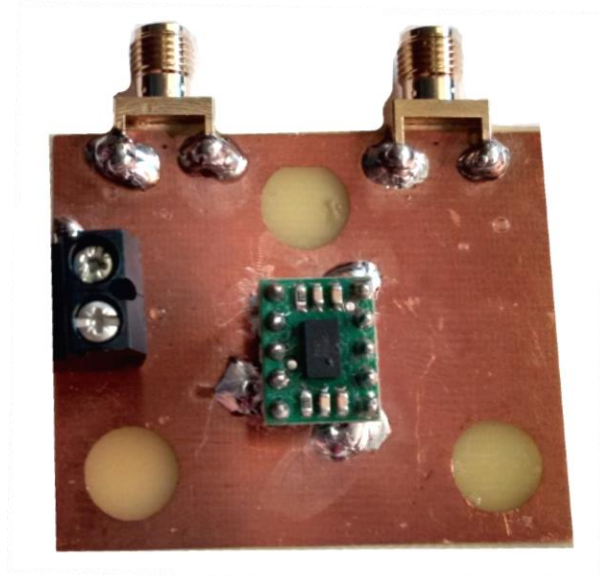


Figura 44. Top PCB MMA7341L.

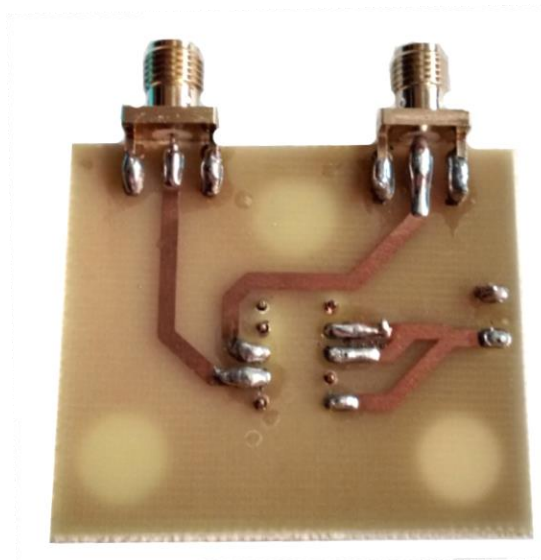


Figura 45. Bottom PCB MMA7341L.

Finalmente los elementos empleados para un acelerómetro MMA7141L son los siguientes:

- 2 cables coaxiales SMA de 1m de longitud. Referencia en RS 526-0308.
- 2 conectores SMA de borde. Referencia en RS 526-5757.
- 2 conectores de montaje en panel SMA. Referencia en RS 512-0036.
- 1 conector terminal 2 pines y paso 5mm. Referencia en RS 425-8720.

Los conectores SMA de montaje en panel se sitúan en la pared de la caja que contiene el Arduino y desde ese punto mediante un cable “*jumper wires*” se conecta a las entradas analógicas del micro-controlador. Un esquema ilustrativo es la siguiente figura, *figura 46*.

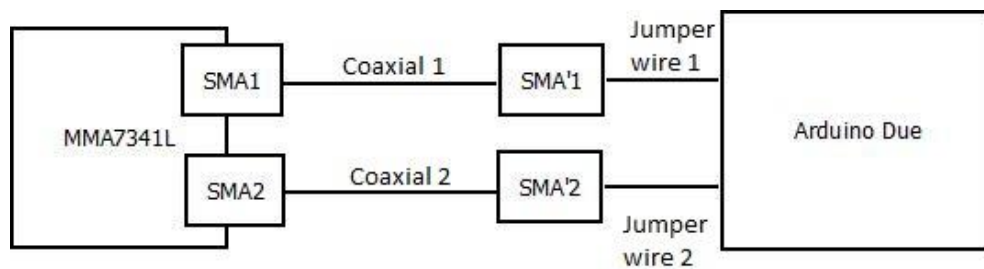


Figura 46. Esquema ilustrativo de conexión entre el sensor MMA7341L y Arduino Due.

4.1.4 Integración de la pantalla LCD HD44780 16x2

La pantalla LCD posee 16 pines. Con el fin de reducir el cableado y facilitar la comunicación se usa un adaptador de comunicación a I2C el cual se puede adquirir junto con el LCD. El módulo se suelda directamente a los pines de la pantalla. En la siguiente tabla se aprecian los pines de conexión necesarios con el empleo del módulo adaptador, **tabla 4**.

LCD HD44780	ARDUINO
VCC	5V
GND	GND
SCL	PIN 21 SCL
SDA	PIN 20 SDA

Tabla 4. Pines de conexión LCD HD44780 y Arduino Due.

Las conexiones se realizan mediante cables “*jumper wires*” nombrados en el subapartado anterior.

El módulo adaptador cuenta con un potenciómetro que regula la intensidad del texto mostrado en la pantalla. Es necesario su ajuste o la pantalla no funciona. En la siguiente ilustración podemos ver su localización, **figura 47**.

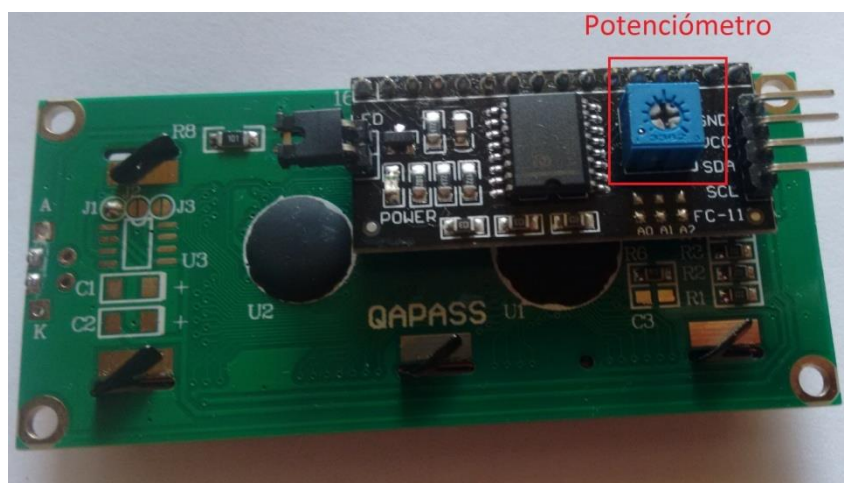


Figura 47. Localización potenciómetro luminosidad en el adaptador de comunicación de la pantalla LCD HD44780.

4.1.5 Conexión del lector de tarjetas microSD y Arduino

Este dispositivo se comunica a través de SPI por lo que necesita cuatro hilos y otros dos para la alimentación. La tarjeta microSD se introduce en una ranura al igual que un teléfono móvil. Las conexiones se exponen en la siguiente tabla, **tabla 5**.

Lector microSD	ARDUINO
VCC	5V
GND	GND
MISO	MISO-SPI
MOSI	MOSI-SPI
SCK	SCK-SPI
CS	PIN 10

Tabla 5. Pines de conexión lector microSD y Arduino Due.

El pin ChipSelect se conecta al pin 10. Sirve cualquier otro pin digital siempre que esté se configure como salida. Arduino Due dispone de pines específicos para el protocolo SPI los cuales se encuentran en el centro cerca del micro-controlador. Ello se observa en la siguiente imagen, **figura 48**:

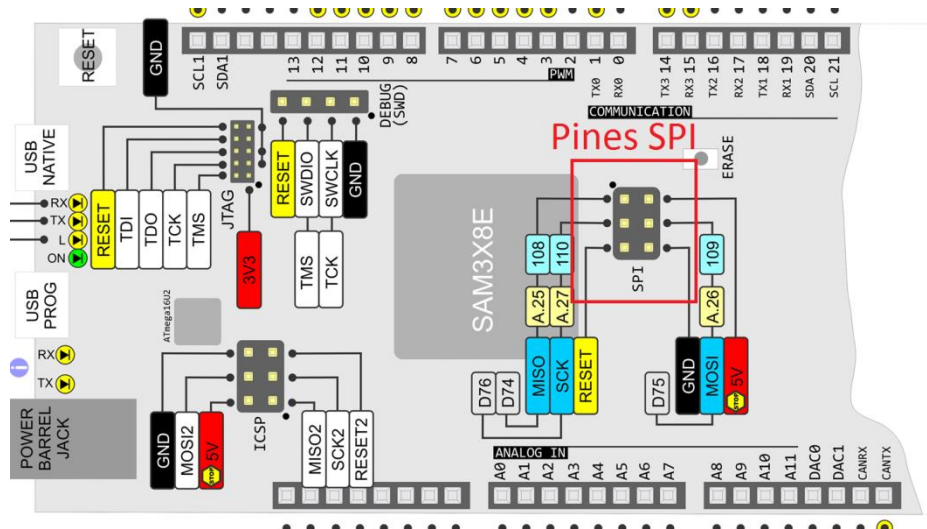


Figura 48. Localización pines SPI en Arduino Due [18].

Las conexiones se realizan mediante cable “*jumper wires*” nombrados anteriormente.

4.1.6 Conexión entre Arduino y PC

La placa del micro-controlador cuenta con un puerto micro USB. Mediante un cable USB a micro USB podemos realizar la conexión. Funciona a través de puerto serie y no solo sirve para cargar el programa en Arduino, también permite el intercambio de datos entre PC y micro-controlador.

Existe otro puerto micro USB llamado “*Native USB*” diseñada para aplicaciones que necesiten periféricos como un teclado o un ratón. En la siguiente imagen, **figura 49**, podemos ver en color verde dicho puerto y en rojo el puerto de programación.

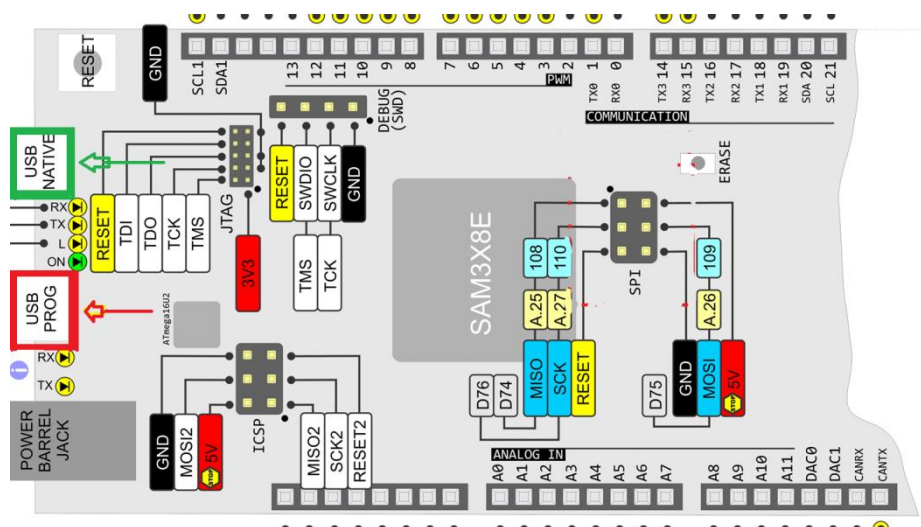


Figura 49. Localización puertos micro USB en Arduino Due [18].

4.1.7 Distribución de la alimentación a los dispositivos

El sistema requiere alimentar seis dispositivos desde Arduino. Conectar todos los cables a un único pin del micro-controlador no es viable por lo que se opta por el diseño de una sencilla PCB para la distribución de alimentación que nos ofrece las siguientes ventajas:

- Dispositivos digitales aislados de los dispositivos analógicos.
- Posibilidad de desconectar un dispositivo concreto sin desmontar los demás.
- Viabilidad del Arduino se requiere un cable por pin de alimentación.

Por los motivos nombrados antes se diseña una PCB en la que los dos sensores analógicos que necesitan una alimentación de 3.3V están aislados de los cuatro dispositivos digitales que necesitan 5 V. Las masas de ambos circuitos se unen en el Arduino. El diseño es el mostrado a continuación, *figura 50, figura 51, figura 52.*

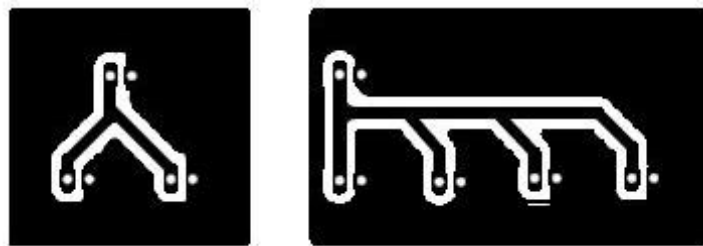


Figura 50. Layout PCB alimentación.

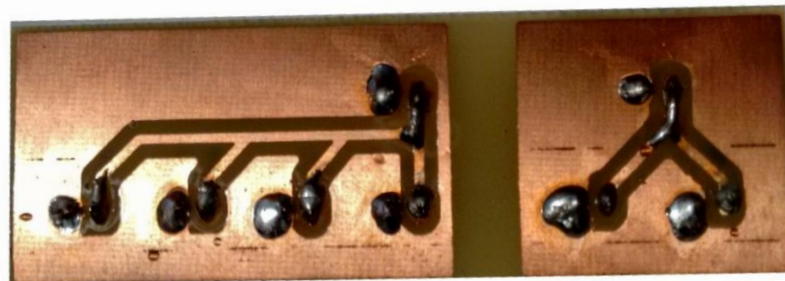


Figura 51. PCB distribuidora de alimentación.

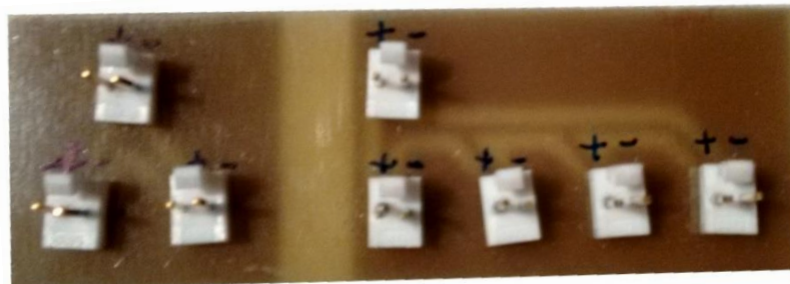


Figura 52. Conectores de la PCB distribuidora de alimentación.

Como se puede observar en la *figura 52* los conectores soldados son individuales y permiten la conexión o desconexión aislada de un dispositivo determinado. En la parte superior se conectan la alimentación que proviene del Arduino, 3.3 V para la parte analógica y 5 V para la parte digital. Los elementos necesarios para este tipo de conexión son los siguientes:

- Conector macho Molex 2.54mm. Referencia en RS 679-5515.
- Carcasa hembra Molex. Referencia en RS 679-5173.
- Crimpado Molex. Referencia en RS 763-1033.

Una ilustración de estos componentes es la *figura 53*.



Figura 53. Componentes conector Molex y montaje final.

4.2 Calibración de los acelerómetros

El proceso de calibración es un conjunto de procedimientos realizados bajo unas condiciones determinadas que nos indica la relación entre los valores y la dispersión posible del resultado.

La calibración de un acelerómetro trata de determinar la sensibilidad que relaciona la salida del sensor con la aceleración a la que esté es sometido [12]. Existen dos tipos de calibración en función de la aplicación de nuestro sensor: calibración para medidas estáticas y calibración para medidas dinámicas.

Para realizar una calibración estática puede realizarse mediante una superficie plana configurable a diferentes inclinaciones. Otro método posible es el uso de un vibrador lineal.

Si es necesaria una calibración dinámica, los procedimientos posibles son los siguientes: calibración basada en interferometría, calibración por vibración y calibración por choque.

En nuestro sistema, los acelerómetros, tanto el MMA7341L como el MPU6050, son prácticamente lineales ya que su desviación máxima (no linealidad) es +-1% y+-0.5% respectivamente.

El procedimiento que se sigue es utilizar el valor típico de sensibilidad proporcionado por el “*datasheet*” de los fabricantes, en el caso del sensor analógico usar además el valor típico de Voffset a 0 G.

4.2.1 Ajuste de la resolución del sensor MMA7341

Arduino Due es capaz de leer una entrada analógica con una resolución de 12 bits y con una frecuencia de conversión de hasta 1 MHz. Se decide configurar la lectura con 11 bits para eliminar fluctuaciones excesivas debidas al ruido del propio sensor. Esto mismo se explica a continuación mediante la ecuación de resolución (18).

$$R = \frac{V_{max}-V_{min}}{2^N-1} \quad (18)$$

R= resolución

V_{max}= voltaje máximo de salida del sensor

V_{min}= voltaje mínimo de salida del sensor

N= número de bits del conversor analógico-digital

Sustituyendo el número de bits por 12 y el rango de voltaje de salida por 3.3V obtenemos una resolución de 0.8mV. Si dividimos la resolución entre la sensibilidad

obtenemos el mínimo incremento de aceleración que somos capaces de detectar. Para ello usamos la siguiente igualdad (19).

$$R_{aceleración} = \frac{R}{S} \quad (19)$$

R_{aceleración}= el mínimo incremento de aceleración detectable

S= sensibilidad expresada en [mV/g]

R= resolución

Siguiendo con el razonamiento anterior resulta que con 12 bits somos capaces de detectar incrementos de 6.8 mg ($6.8 \times 10^{-3} \times 9.8 \text{ m/s}^2$). Un resultado de resolución muy bueno pero presenta el problema de que el sensor fluctúa continuamente. Ello es debido al ruido del propio sensor como vamos a ver a continuación (20).

$$Ruido[mg] = BW \times S_r \quad (20)$$

Ruido= ruido medido en unidades de aceleración [mg]

BW= ancho de banda

S_r= sensibilidad al ruido del sensor en mg/ $\sqrt{\text{Hz}}$

Si colocamos el ancho de banda de 400 Hz y el ruido de 0.35 mg/ $\sqrt{\text{Hz}}$ obtenemos que el ruido es 7 mg y supera a la resolución calculada anteriormente.

Por este motivo se decide despreciar el último bit y realizar lecturas con 11 bits que nos ofrece una resolución de 13.6 mg y conseguimos disminuir las fluctuaciones de datos cuando el sensor esta en reposo.

La respuesta de los sensores situados en horizontal y en reposo es casi correcta pero presentan una apreciable desviación respecto a 0 G (o respecto a 1 G si es el eje sometido a la fuerza gravitatoria). Por ello se decide calibrar estáticamente todos los sensores en todos sus ejes.

4.2.2 Calibración estática del sensor MMA7341L

Se sitúa el sensor en posición horizontal sobre una superficie plana y se deja en reposo. Se registran los datos arrojados por el sensor y se observa que el eje X y el eje Y que se hayan paralelos al suelo su salida no es 0.00 G sino 0.05 G y 0.07 G respectivamente. En el eje Z se observa que la salida no es 1 G sino 0.81 G.

El método de calibración realizado consta de los siguientes pasos:

1. Situar el sensor en posición horizontal sobre una superficie plana y en reposo.
2. Anotar 20 datos de cada eje.

3. Realizar la media de esos datos.
4. Observar la desviación con respecto a su salida teórica correcta.
5. Usar el offset calculado para calibrar el sensor.

Los datos en bruto leídos por Arduino son niveles de resolución del conversor A/D. Como ya se vio anteriormente éste se configura con 11 bits. Si un eje no experimenta ningún tipo de aceleración su lectura debe ser 1024 niveles que es justo la mitad de 2^{11} ya que el sensor tiene un offset de 1.65V a 0G. En lugar de eso nuestro sensor está leyendo de media:

- Eje X 1038.5 niveles de conversor A/D
- Eje X 1044 niveles de conversor A/D

Si el sensor debería generar 1024 niveles y nos proporciona otros valores, solo tenemos que realizar la diferencia entre la media de los valores y el valor teórico. El resultado de la resta lo multiplicamos por la resolución ya obtenemos el offset necesario expresado en [V]. Esto queda expresado en las ecuaciones (21), (22).

$$\text{Valor teórico} - \text{Media valores reales} = \text{diferencia en niveles de resolución} \quad (21)$$

$$\text{Voffset} = \text{diferencia} \times \text{Resolución [V]} \quad (22)$$

Obteniendo que para el eje X el Voffset necesario es -0.023 V y para el eje Y el Voffset es -0.037 V.

Para poder calibrar el eje Z se pone el sensor en vertical y se deja en reposo de forma que dicho eje no experimenta ninguna aceleración ni fuerza gravitatoria y se realiza el método de calibración desde el paso 2. El sensor obtiene de media:

- Eje Z 970 niveles de conversor A/D

Siguiendo el procedimiento como se ha hecho para los otros ejes se obtiene que el Voffset es 0.087 mV.

Estos valores de offset obtenidos se integran en la ecuación de salida del sensor reordenada para obtener el valor de aceleración en función del voltaje. Ello se explica mediante las siguientes ecuaciones (23), (24):

$$V_s = S \times G + V_0 \quad (23)$$

V_s = voltaje salida del sensor (en un eje).

S = sensibilidad en [mV/g].

G = aceleración medida en [g].

V_0 = voltaje offset del sensor a 0G, su valor es 1.65V.

Ordenando esta ecuación, despejando G y añadiendo el término de offset calculado anteriormente para un eje determinado se obtiene **(24)**.

$$G = \frac{V_s - V_0 + V_{off}}{S} \quad (24)$$

V_s= voltaje salida del sensor (en un eje).

S= sensibilidad en [mV/g].

G= aceleración medida en [g].

V₀= voltaje offset del sensor a 0G, su valor es 1.65V.

V_{off}= voltaje offset de corrección calculado empíricamente.

El V_{off} ya lleva el signo implícito por lo que si el sensor necesita bajar su nivel para estar calibrado es V_{off}<0 y si necesita aumentar su nivel es V_{off}>0.

Tras la calibración el sensor se coloca en diferentes posiciones verticales y horizontales y se comprueba que las salidas son correctas.

Nuestro sensor es necesario que esté configurado con el fondo de escala 11G y cuando se realizó la calibración estaba configurado en 3G. Tras configurarlo en 11G se observa que existen problemas de calibración de nuevo por lo que se hizo el mismo procedimiento de calibración pero esta vez con el fondo de escala 11G.

El segundo sensor MM7341L también presenta errores y se calibra con el mismo método. Para diferenciarlos **se nombra como MMA7341L B**.

Para una mejor visualización de los offsets de calibración calculados para los dos sensores, tanto en modo 3G como 11G, se elabora la siguiente tabla, **tabla 6**.

	MMA7341L		MMA7341LB	
	+3G	+11G	+3G	+11G
Eje X	-0.023V	-0.046V	-0.015V	-0.002V
Eje Y	-0.037V	-0.062V	-0.014V	-0.03V
Eje Z	0.087V	-0.025V	0.048V	-0.009V

Tabla 6. Valores de calibración de los sensores MMA73141L.

4.2.3 Calibración estática del sensor MPU6050

El sensor MPU6050 es digital y como tal la calibración se realiza intrínsecamente a través de los registros internos. Al ser un sensor que registra datos de 16 bits es necesario 2 registros de 8 bits por eje para guardar el offset de su calibración.

El método seguido es muy similar al empleado en la calibración del sensor MMA7341L difiriendo en que no es un sensor analógico y no hay que hacer operaciones con la resolución y el voltaje.

Al igual que anteriormente existen dos sensores MPU6050 y para diferenciarlos uno de ellos se nombra como MPU6050 B.

Se sitúa el sensor en horizontal y en reposo. Se corrige la salida mediante iteración aumentando el valor offset de los registros hasta obtener una salida correcta.

Puestos a calibrar el sensor, se calibra también los giróscopos que aunque no son necesarios para nuestra aplicación existe la posibilidad de usarlos en un filtro Kalman combinados con la aceleración.

En la tabla, **tabla 7**, se pueden ver los registros y sus valores.

Registros(hex)	MPU6050	MPU6050 B
Eje X 0x06	0	0
Eje X 0x07	60	160
Eje Y 0x08	0	0
Eje Y 0x09	160	230
Eje Z 0x0A	0	0
Eje Z 0x0B	40	255
	Giróscopos	
Eje X 0x13	0	0
Eje X 0x14	130	136
Eje Y 0x15	0	0
Eje Y 0x16	37	37
Eje Z 0x17	0	0
Eje Z 0x18	6	25

Tabla 7. Calibración estática de los sensores MPU6050.

El error que tienen los sensores es bajo por ello no es necesario modificar ningún registro de MSB “*Most Significant Bit*” y se dejan con valor ‘0’.

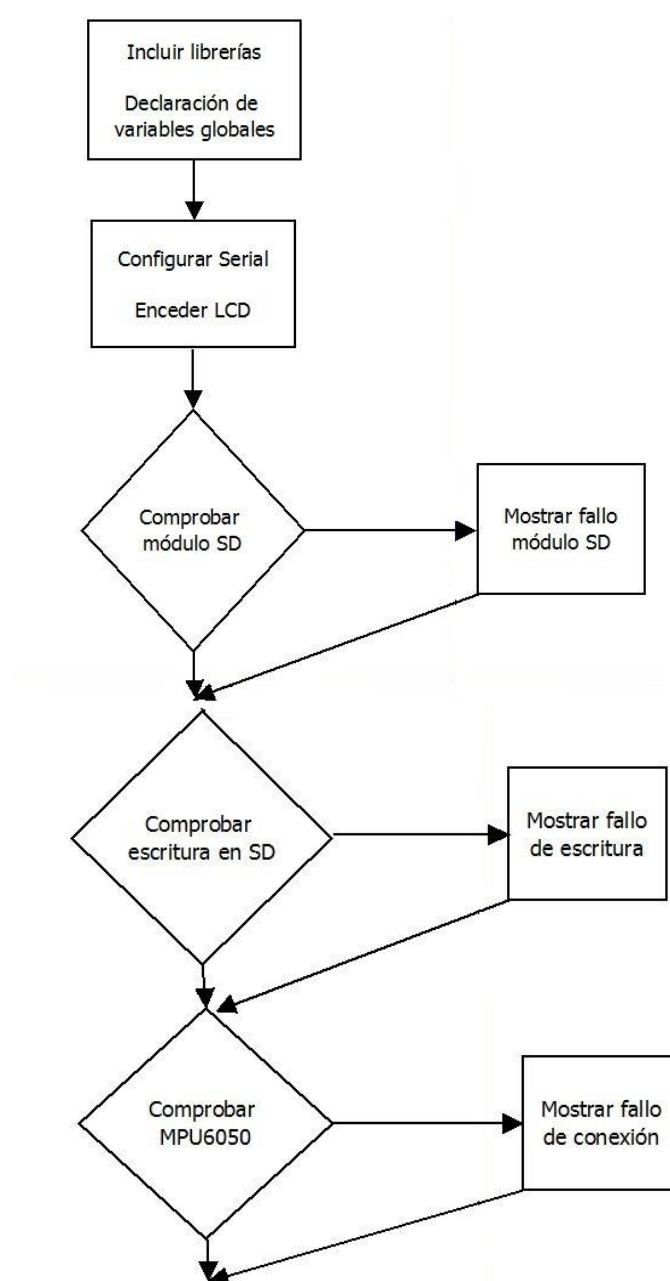
En este apartado no se explica cómo se accede y se modifican estos registros, se detalla el proceso en el **Anexo 7. Programación Arduino Due**.

A simple vista puede parecer que el sensor digital es mejor que un acelerómetro analógico al tener registros que guarden configuraciones y valores de offset. En concreto MPU6050 tiene un manual de usuario en el que aparece un mapa de registros. La información del funcionamiento es escueta y no aparecen los registros de offset usados en la **tabla 7**. Por ello un acelerómetro digital es más versátil pero a la vez de mayor complejidad.

4.3 Implementación software

4.3.1 Programación del sistema micro-controlador

Nuestro sistema ya cuenta con todos los dispositivos, con los interfaces de comunicación y con la calibración de los acelerómetros. Es el momento de explicar de forma simplificada y mediante un esquema las principales etapas de la programación implementadas en Arduino Due. Esto es necesario para una correcta interpretación de los datos registrados. A continuación se expone el diagrama mediante dos ilustraciones, *figura 54*, *figura 55*.



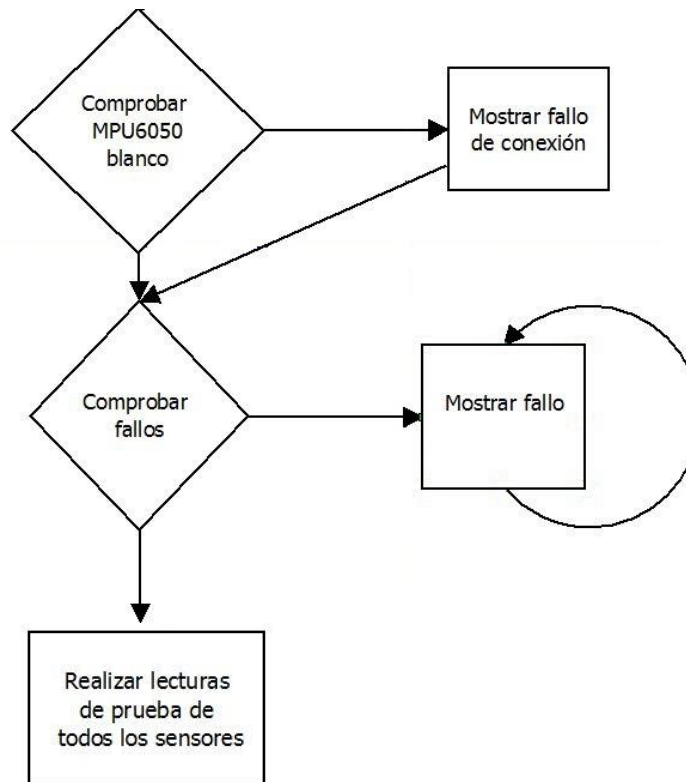


Figura 54. Diagrama de programación etapa de comprobación de fallos y test de sensores.

Básicamente, como se puede observar, la primera etapa de programación consiste en comprobar todo el sistema. En el caso de que falle la conexión con algún dispositivo se muestra el fallo a través de la pantalla LCD y se sigue comprobando los demás.

Si alguno de los dispositivos falla genera un fallo de sistema que en comprobar fallos es detectado y la ejecución del programa se estanca y se muestra continuamente que el sistema no funciona correctamente.

En el caso de que no haya ningún fallo se muestran por pantalla cinco lecturas de cada sensor para comprobar que responden y que los valores recogidos son adecuados.

Después de este pequeño “test” pasamos al programa principal en el que se recogen los datos de los cuatro sensores y se guardan en una tarjeta microSD.

El programa principal es el contenido dentro del recuadro rojo de la figura inferior, *figura 55*.

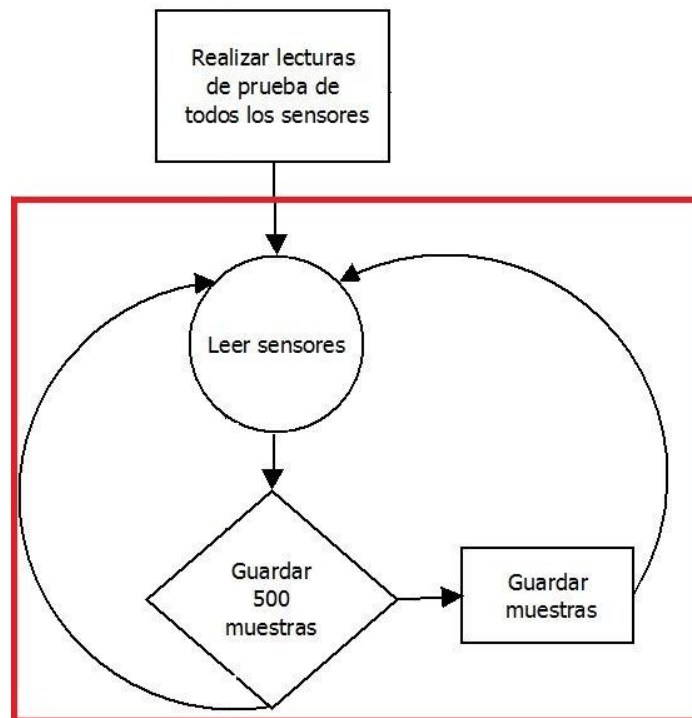


Figura 55. Diagrama de programación etapa de programa principal.

Primordialmente se recogen datos de los acelerómetros y se guardan en una matriz con 500 filas y tantas columnas como datos queremos almacenar. En nuestro caso 8 columnas para los valores de los sensores y 2 columnas más, una para el número de muestra y otra para el tiempo de muestreo real. Dicha matriz se escribe y se guarda cada 500 muestras ya que la demora causada al guardar es notable, de unos 160 ms. El programa se basa en recoger muestras de todos los sensores continuamente hasta que el usuario decida apagar el sistema.

Se usa una arquitectura cíclica basada en el “*polling*” debido a que nos interesa registrar los cuatro sensores en el mismo momento ya que la suspensión delantera influye en la trasera y viceversa. Si se usan interrupciones a partir de un umbral de aceleración sería necesario que tras la interrupción se recojan datos de los cuatro sensores y elegir un umbral muy preciso que permita registrar valores de aceleración necesarios de pequeña amplitud y a la vez eliminar el posible ruido no deseado. El método de interrupciones es más complejo, y una vez producida la interrupción el programa debe actuar igual que si fuese “*polling*” hasta que se baje del umbral por lo que se opta por usar la arquitectura cíclica.

Los datos registrados se guardan en bruto sin transformarlos en aceleración para aligerar el procesador y poder conseguir una frecuencia de muestreo mayor. Como los valores se analizan a posteriori de recogerlos, es muy sencillo mediante Matlab transformar dichos valores a aceleración. Gracias a esto conseguimos aumentar la frecuencia de muestreo de unos 450 Hz a unos 730Hz. En el **Anexo 7** encontramos las principales instrucciones usadas en la programación. En el siguiente apartado se explica cómo se convierten los datos con la herramienta MATLAB.

4.3.2 Análisis de datos mediante MATLAB

MATLAB es una herramienta software que permite diseñar y analizar sistemas. Está orientada a resolver problemas científicos e ingenieriles. Posee gráficos que permiten la visualización de los datos lo que permite su análisis visual [19]. Esto último es lo utilizado para este proyecto.

Nuestro Arduino es capaz de guardar los datos de múltiples formas, en cambio nosotros los guardamos en columnas separadas por espacios y solo caracteres numéricos, es decir, sin ningún texto. Al hacerlo de este modo se pueden leer y almacenar los datos en diferentes vectores columna mediante MATLAB. En nuestro caso la versión usada es MATLAB R2016b con licencia universitaria.

Los datos registrados por los sensores se importan desde el fichero de texto generado por el micro-controlador [20] y una vez disponemos de ellos en forma de variable los transformamos en aceleración. Hay dos tipos de datos, los provenientes de los sensores digitales MPU6050 y los de los sensores analógicos MMA7341L.

4.3.2.1 Transformación de los datos recogidos por el sensor MPU6050

El acelerómetro nos proporciona una salida de 16 bits de resolución y en función de la escala seleccionada tiene una sensibilidad u otra. En nuestro sistema se configura con fondo de escala $\pm 8G$ y una sensibilidad 4096 LSB/g. Para realizar la transformación a aceleración en [g] es directa solo se requiere dividir entre la sensibilidad.

El código de MATLAB que realiza las operaciones necesarias es el siguiente.

```
MPU6050_ejeX=datos_ejeX/4096;  
MPU6050_ejeY=datos_ejeY/4096;
```

Para el segundo sensor MPU6050 son las mismas operaciones pero hay que nombrar las variables con otro nombre para que no se sustituyan los valores.

4.3.2.2 Transformación de los datos recogidos por el sensor MMA7341L

La salida del sensor es analógica y el Arduino la lee a través de un conversor A/D configurado a 11bits de resolución. Los niveles leídos los transformamos en voltaje, le restamos el offset a aceleración nula y le sumamos la calibración. Tras estas operaciones se divide entre la sensibilidad y obtenemos la aceleración expresada en [g]. Todo esto se expresa en la siguiente ecuación (25)

$$G = \frac{N_{sensor} \times \left(\frac{3.3}{2048}\right) - V_0 + V_{off}}{S} \quad (25)$$

Nsensor= niveles de conversor A/D leídos.

S= sensibilidad escala 11G, 0.1178 [V/g].

G= aceleración medida en [g].

V0= voltaje offset del sensor a 0G, su valor es 1.65V.

Voff= voltaje offset de corrección calculado empíricamente.

El código de MATLAB que realiza las operaciones necesarias es el descrito a continuación.

```
MMA7341_ejex = ((datos_x*3.3/2048)-1.65-0.046)/0.1178;
MMA7341_ejeY = ((datos_Y*3.3/2048)-1.65-0.0628)/0.1178;
```

El caso representado es el del primer sensor MMA7141L y aparecen los offsets correspondientes a cada eje para ese sensor. En el caso del segundo MMA7341L hay que poner sus valores correspondientes pero el procedimiento es el mismo.

4.3.2.3 Otras funciones

Los datos que recogemos mediante los sensores los transformamos en aceleración pero algo más podemos hacer con ellos para sacarles partido. Algunas de las muchas herramientas que disponemos en MATLAB se explican a continuación.

Representar datos

Una vez tenemos los datos transformados nos interesa visualizarlos para su análisis. Esto se hace con una instrucción sencilla mostrada a continuación.

```
plot(aceleración')
```

Siendo aceleración la variable a representar.

Filtro paso bajo 1 polo

MATLAB tiene herramientas propias para diseñar un filtro según nuestros requisitos. Se puede definir el orden, la atenuación, la frecuencia de corte, etc.

En lugar de eso a continuación se especifica la instrucción para filtrar una variable con un paso bajo de orden 1.

```
Datos_filtrados = filter( t/tau, [1 (t/tau)-1], datos);
```

La variable t es la inversa de la frecuencia de muestreo y τ es la constante de tiempo del filtro a la frecuencia de corte elegida.

4.3.2.4 Integración para obtener velocidad y posición

En el sistema, los sensores son capaces de medir aceleración pero no velocidad ni posición. Con ayuda del análisis matemático se puede calcular la posición de un cuerpo integrando dos veces la aceleración como vemos en la siguiente ecuación, (26)

$$p = \int \int_0^t a(t) dt \quad (26)$$

p =posición

$a(t)$ = función de la aceleración

La función de la aceleración $a(t)$ no está definida y no se puede hallar la integral de forma analítica. Los valores registrados por los acelerómetros son discretos, es decir, en un determinado tiempo de muestreo. Por ello para resolver la integral se utiliza la integración numérica para realizar una aproximación.

Hay diferentes métodos de aproximación pero en este proyecto se usa la regla del trapecio que se adapta correctamente a datos discretos y es sencilla su implementación.

Regla del trapecio

Este método de aproximación es equivalente a sustituir la función a integrar por un polinomio de grado uno, es decir por una recta. Dicha recta pasa por el punto de inicio y el punto final del intervalo a integrar. Se forma un trapecio cuya área es la aproximación a la integral [14]. A continuación se muestra una imagen sobre ello, **figura 56**.

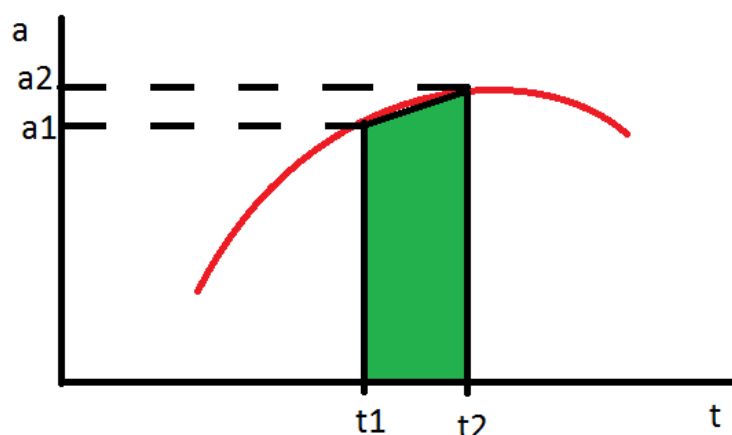


Figura 56. Regla del trapecio.

Como podemos observar la integración por la regla del trapecio es una aproximación eficaz y el valor del área aproximada (resaltada en color verde) sigue la siguiente expresión (27).

$$\int_{t1}^{t2} a(t) dt \sim V(t2) - V(t1) = (t2 - t1) \times \frac{(a1+a2)}{2} \quad (27)$$

Usando dicha expresión en realidad lo que hallamos es el incremento de velocidad producido en el intervalo. Para conseguir la velocidad en un determinado momento solo tenemos que despejar $V(t2)$, de forma que la velocidad es la anterior más el incremento.

Se toma que la velocidad inicial es 0 m/S ya que no tiene sentido encender el sistema de instrumentación cuando la bicicleta está en marcha.

Una vez tenemos la velocidad podemos calcular la posición siguiendo el mismo procedimiento que el usado para calcular la velocidad a partir de la aceleración. El resultado se expresa en la ecuación inferior (28)

$$\int_{t1}^{t2} v(t) dt \sim p(t2) - p(t1) = (t2 - t1) \times \frac{(v1+v2)}{2} \quad (28)$$

Ahora vamos a ver el código implementado en MATLAB y que se encarga de realizar la aproximación de la regla del trapecio a los datos recogidos por nuestros acelerómetros.

//cálculo de la velocidad a partir de la aceleración en MPU6050 [20]

```
x=VarName4/8915;// transformamos los valores a aceleración[g]
n=size(x);//calculamos cuantos datos hemos tomado

//si hemos seleccionado la última casilla en blanco cuyo dato no se
conoce que su valor sea 0

x(isnan(x))=0;
x=x*9.8; // transformamos a [m/s^2]

//rotamos el vector x una posición para obtener la aceleración en (t-1)
aceantes=circshift(x,1);

// si al rotar se genera un dato desconocido que su valor sea 0
aceantes(isnan(aceantes))=0;
incremento=0.5*(aceantes+x)*0.00137;// se usa la expresión(27)
v(n)=0;//almacenara el valor de velocidad

for i=2:n
v(i)=v(i-1)+incremento(i);// se calcula la velocidad en cada punto
end
```

//cálculo de la posición a partir de la velocidad en MPU6050

```
velantes=circshift(v,1);
velantes(isnan(velantes))=0;
pos=0.5*(v+velantes)*0.00137;
p(n)=0;

for i=2:n
p(i)=p(i-1)+pos(i);
end
```

Se usa el tiempo de muestreo medio que usando los cuatro sensores es 1.37 ms que se corresponde con una frecuencia de 730Hz. Una aplicación de la regla del trapecio se expone en el **Anexo 6**.

El error cometido al usar este método de integración numérica viene dado por la siguiente ecuación [21], (29)

$$\epsilon = -\frac{1}{12}(b-a)^3 \times f''(\epsilon) \quad (29)$$

b=punto final del intervalo

a=punto inicial del intervalo

f''= derivada segunda de la función

ϵ= error de la aproximación

ε= un punto cualquiera dentro del intervalo (a,b)

Llegados a este punto, el sistema de instrumentación está preparado para recoger datos solo queda explicar cómo se ensambla todo esto en la bicicleta. Esto mismo es lo que se explica en el apartado sucesivo.

4.4 Soportes Mecánicos del sistema

El sistema ya está desarrollado y listo para poner en conjunto todos los dispositivos y ser instalado en la bicicleta para cumplir su cometido. Es necesario deliberar profundamente como sujetar cada elemento puesto que el ambiente al que se va a enfrentar es hostil, desde situaciones pacíficas hasta grandes sacudidas pasando por vibraciones repetitivas. Anteriormente se aclaró que el sistema no está preparado contra agentes externos como lluvia, nieve o barro ya que el objetivo es probar el funcionamiento mediante un prototipo.

Los componentes a montar se pueden clasificar en tres tipos, los pertenecientes a la suspensión delantera, los referentes a la suspensión trasera y los que forman la unidad central de control y registro. A continuación vamos a ver en detalle cómo se ensamblan los dispositivos siguiendo dicha tipificación.

4.4.1 Elementos del sistema situados en la suspensión delantera

Los dispositivos pertenecientes a esta categoría son dos acelerómetros. Uno de ellos es digital, MPU6050, y el otro es analógico, MM73141L. El MPU6050 se monta arriba de la suspensión en la parte considerada “fija” y el MMa7341L en la parte inferior considerada “móvil”.

Un factor importante a tener en cuenta es la orientación a elegir de los ejes. Se valoran dos opciones predominantes. Una de ellas en el eje Y sea paralelo al suelo y el eje X sea vertical u otra opción en el que el eje X sea colineal con desplazamiento lineal de la horquilla. Las opciones posibles se reflejan en la siguiente imagen *figura 57*.

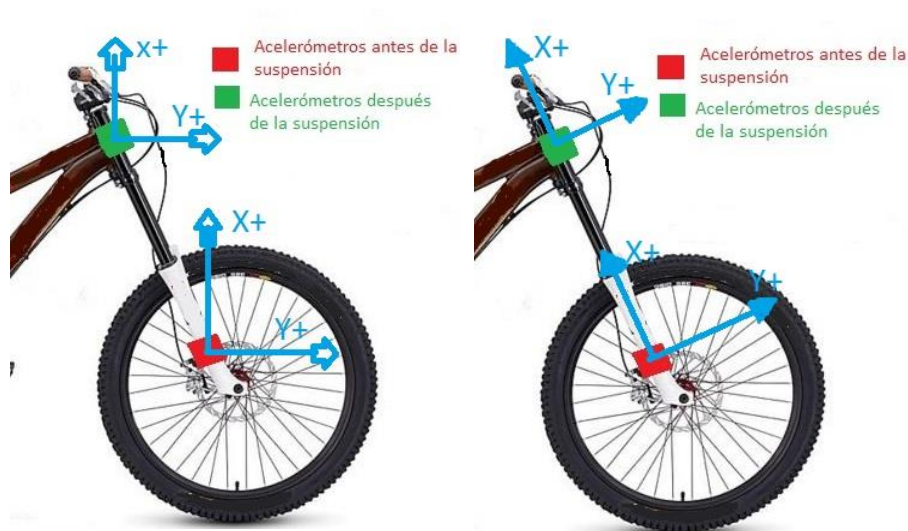


Figura 57. Posible orientación de los ejes cartesianos de los acelerómetros montados en la horquilla.

Finalmente se elige la opción 2, la imagen de la derecha, porque ofrece un registro directo, sin ningún tipo de descomposición, de la aceleración que sufre la suspensión. Un punto en su contra es que la fuerza gravitatoria es vertical y hay que descomponerla.

El ángulo de dirección también conocido como lanzamiento de la horquilla es 66.3° en la bicicleta de prueba modelo Specialized Big Hit 3 del año 2007. Mediante las relaciones trigonométricas y dicho ángulo podemos descomponer la gravedad en los ejes obteniendo el siguiente resultado.

- Eje x. $a_x = -g \cdot \sin(66.3) = -0.91 \text{ [G]}$
- Eje y. $a_y = -g \cdot \cos(66.3) = -0.40 \text{ [G]}$

Las unidades de medida [G] hace referencia a la gravedad de forma que si una aceleración es $0.5G$ eso quiere decir que es $0.5 \cdot 9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$. Se expresa de este modo ya que la sensibilidad de los acelerómetros usan esta unidad.

Una vez decido la colocación y orientación de los sensores el siguiente paso es la fijación. Para ello se decide el diseño personalizado de unos soportes que se adapten lo mejor posible a los sensores.

Se emplea el programa de diseño en 3D Solid Edge V19 para crear los soportes que posteriormente se imprimen en plástico con una impresora 3D.

4.4.1.1 Diseño soportes delanteros MMA7341L y MPU6050

La horquilla sobre la cual vamos a montar los sensores es una Rockshox Boxxer RC modelo 2010. Debido a que la horquilla es un tubo, tiene forma cilíndrica, los soportes se piensan del tipo abrazadera que se adaptan perfectamente y proporcionan una fijación sólida.

Primeramente se piensa en el empleo de tornillos para realizar la fuerza de abrazadera y un diseño que abarque el tubo al completo pero finalmente se opta por un diseño más práctico.

Se realiza un soporte en el que no se abarca la forma de tubo de la suspensión completamente sino parcialmente. Menos de la mitad del círculo del tubo. Después mediante bridas y un material de goma para mejor adaptabilidad y fuerza de rozamiento, fragmentos de cámara de bici, se fija a la bicicleta.

El soporte tiene una parte tipo caja donde se alojara el sensor que queda fijo presionado por la tapa. La tapa se sujeta mediante una brida al cuerpo del soporte. Una explicación más ilustrativa es que conseguimos sujetar el sensor haciendo un “*sándwich*” con el cuerpo del soporte, el sensor, que se sitúa en medio, y la tapa.

El diseño final es prácticamente cerrado excepto por el hueco de salida de los cables. A continuación de muestran unas imágenes *figura 58*.

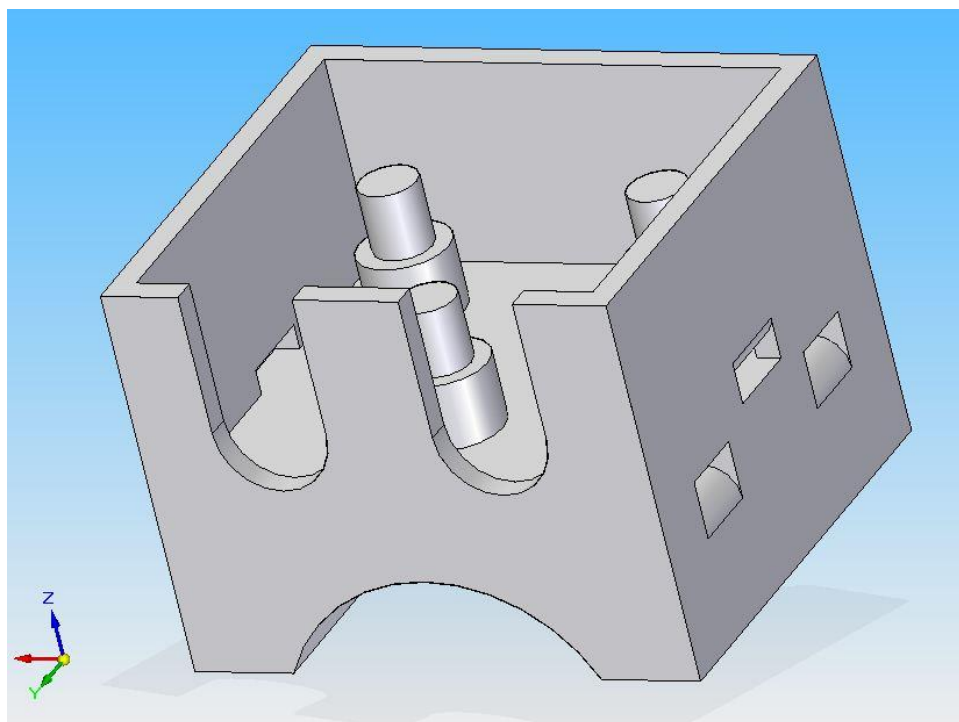


Figura 58. Diseño de la base para el sensor MMA7341.

Como se puede observar el diseño cuenta con tres pivotes de 7 mm de diámetro en los que los agujeros de la PCB encajan y así se logra evitar desplazamientos. Por otra parte existen dos ranuras para las señales de salida a través de cables SMA y agujeros laterales pasantes en los que se introducen las bridas. La tapa de la base es la siguiente: **figura 59**.

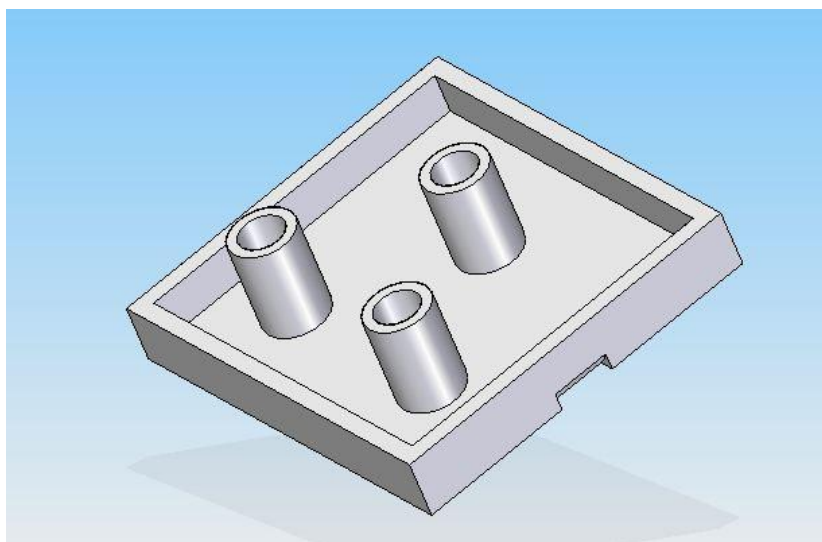


Figura 59. Diseño de la tapa para el sensor MMA7341.

La tapa es la encargada de sujetar el sensor en su sitio. Para ello mediante una brida se aprieta contra la base y mediante los pivotes aprisiona la PCB.

El diseño para el sensor digital es muy similar. Se usa el sensor tal cual se compró, es decir, sin integrarlo en otra PCB y se aprovechan los taladros que tiene. Unas imágenes de ilustrativas se exponen abajo, **figura 60, figura 61**.

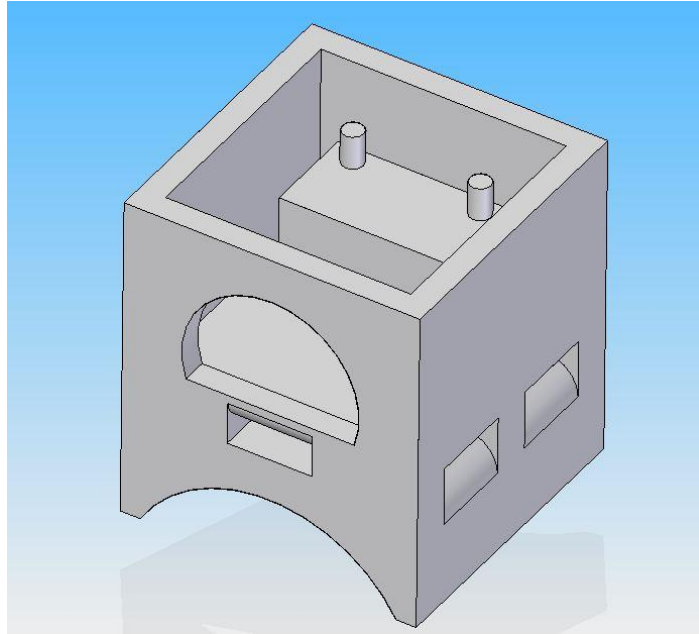


Figura 60. Diseño de la base para el sensor MPU6050.

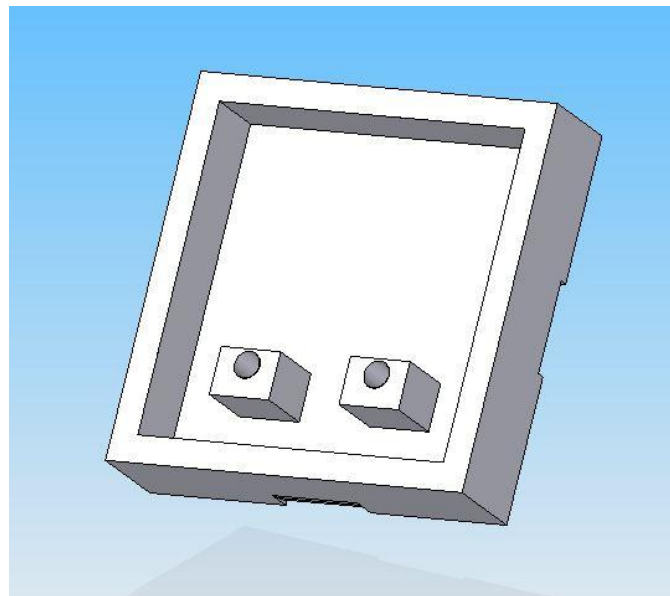


Figura 61. Diseño de la tapa para el sensor MPU6050.

Los planos acotados de ambos diseños, tanto para el sensor MMA7341L como para MPU6050, se encuentran en el **anexo 1 y 2** respectivamente.

4.4.2 Elementos del sistema situados en la suspensión trasera

Los dispositivos presentes en la parte trasera de la bicicleta son dos acelerómetros al igual que sucede en la parte delantera. Uno de ellos es digital, MPU6050, y el otro es analógico, MM73141L. El MPU6050 se monta cerca del sillín en el chasis y el MMA7341L en la parte inferior del chasis y lo más próximo al eje de la rueda trasera.

La orientación de los ejes cartesianos en este caso se elige con el eje X positivo en la vertical ascendente y el eje Y positivo en horizontal y hacia la parte delantera de la bici. Tanto la colocación como la orientación se muestran en la siguiente imagen *figura 62*.



Figura 62. Orientación de los ejes cartesianos de los acelerómetros montados en la parte trasera de la bicicleta.

Se decide el diseño personalizado de unos soportes que sujeten lo mejor posible los sensores a la bicicleta en las zonas mostradas.

Se emplea el programa de diseño en 3D Solid Edge V19 para crear los soportes que posteriormente se imprimen en plástico con una impresora 3D.

4.4.2.1 Diseño soportes traseros MMA7341L y MPU6050

Anteriormente se mostró como son los soportes diseñados para la parte delantera, los de la parte trasera son exactamente igual en lo que respecta a la caja dónde se aloja el sensor y a la tapa. Las diferencias se encuentran en la parte inferior de la base ya que

ahora se deben acoplar al chasis que tiene forma rectangular en lugar de cilíndrica. En nuestro caso la bicicleta es una Specialiezed Big Hit 3 modelo 2007.

Los diseños finales son parecidos a los anteriores. A continuación de muestran unas imágenes centrándonos en la parte inferior *figura 63, figura 64.*

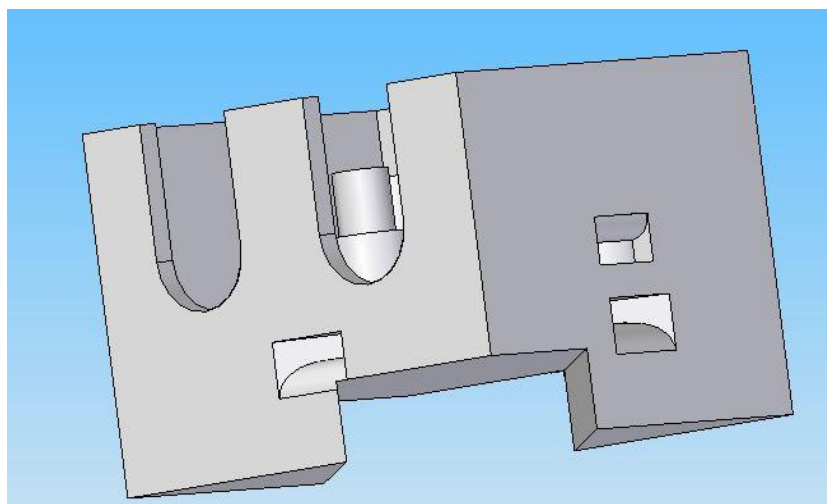


Figura 63. Diseño de la base para el chasis del sensor MMA7341.

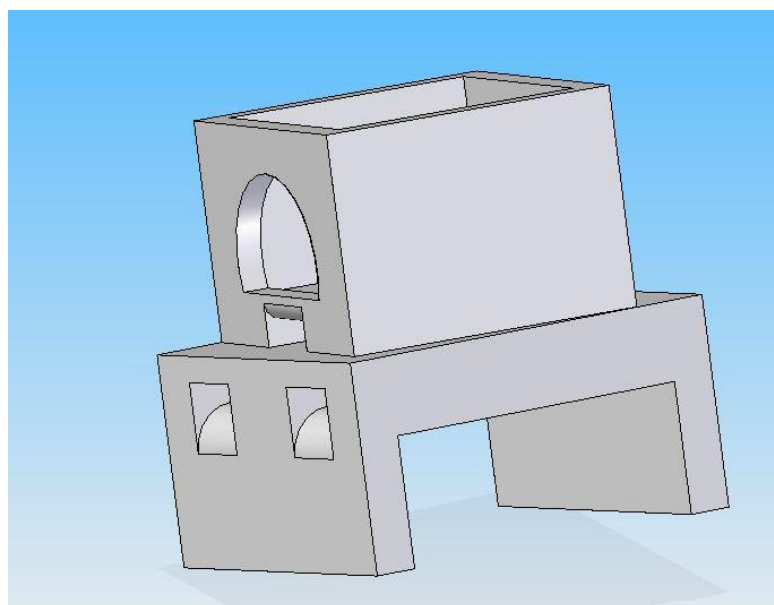


Figura 64. Diseño de la base para el chasis del sensor MPU6050.

Con estos soportes se finaliza el proceso de diseño del sistema y se procede a la realización de pruebas de campo con la bicicleta. Esto mismo se expone en el siguiente capítulo. Los planos acotados de ambos diseños, tanto para el sensor MMA7341L como para MPU6050, se encuentran en el **anexo 3 y 4** respectivamente.

4.4.3 Elementos del sistema situados en la unidad central

La unidad central está compuesta principalmente por un Arduino Due. También integra los periféricos necesarios como son el módulo adaptador de tarjetas microSD, la pantalla LCD HD44780 y la PCB de distribución de alimentación. Si solo se contase con el Arduino se valoraría la opción de sujetar a la bicicleta la placa del micro-controlador pero como disponemos de más elementos se decide integrarlos todos en una caja y sujetar la caja a la bicicleta.

Tomada la decisión de utilizar una caja se toman medidas de los diferentes elementos siendo el de mayor tamaño el Arduino. Dicho dispositivo mide aproximadamente 105x55x11mm. Estas medidas nos condicionan el tamaño mínimo de la caja.

Finalmente, para tener margen de maniobra y hueco para los demás dispositivos se utiliza una caja de plástico transparente de tamaño 115x80x56mm siendo válida cualquier caja capaz de albergar los elementos y conexiones. Nos permite comprobar visualmente el interior de la caja y es un material fácilmente manipulable.

La colocación espacial de los elementos es la siguiente:

- Arduino Due en el centro en la parte inferior (en el fondo).
- LCD en el lateral derecho.
- PCB de alimentación en el lateral izquierdo.
- Lector microSD en el panel posterior.
- Entrada de alimentación, microUSB, cables, y SMA de panel en el panel frontal.

Una imagen que nos resume todo esto es la siguiente, **figura 65**:

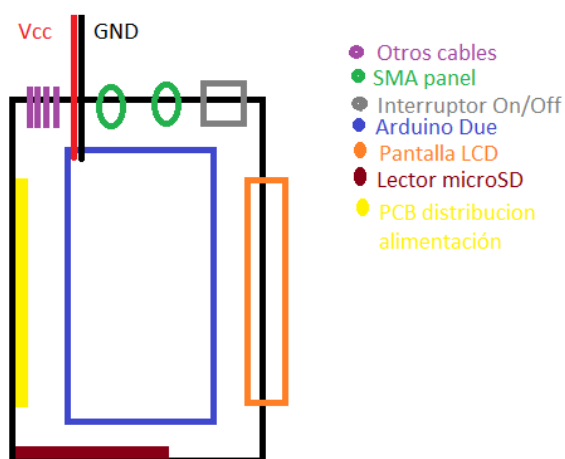


Figura 65. Distribución espacial de los dispositivos en la caja de la unidad central.

Una ilustración del montaje real sin los cables de conexionado es la figura, **figura 66**.



Figura 66. Distribución espacial real de los elementos en la caja.

Los diferentes elementos se fijan usando tornillos de M3 en los agujeros disponibles de fábrica excepto en el módulo microSD que se usan de M2. A continuación se muestra una lista en la que se detallan las unidades:

- Arduino Due: 6 tornillos M3 rosca chapa.
- Pantalla LCD: 4 tornillos M3 rosca chapa.
- PCB distribución de alimentación: 2 tornillos M3 rosca chapa.
- Módulo lector microSD: 4 tornillos M2 rosca chapa.

Una vez realizadas todas las conexiones se fijan los cables con pegamento termo fusible.

En el siguiente capítulo se detalla como el sistema y los elementos mecánicos son instalados en la bicicleta así como la realización de pruebas de campo.

Capítulo 5. Pruebas de campo

En este capítulo se pone a prueba el sistema de instrumentación diseñado. Para ello se realiza el montaje de los componentes mecánicos con los sensores en su interior y se conectan los dispositivos según las conexiones descritas anteriormente.

5.1 Instalación del sistema en la bicicleta

El sistema electrónico de monitorización se aplica a una bicicleta de descenso cuya marca y modelo es Specialized Big Hit 3 (2007). Es necesario especificar al menos las suspensiones que realmente monta la bicicleta ya que son componentes intercambiables y puede que el usuario no mantenga las piezas originales. En nuestro caso la suspensión delantera es una horquilla Rockshox Boxxer RC modelo 2010 y el amortiguador trasero es un Fox DHX 4.0 modelo 2007 (el modelo original que monta la bicicleta).

Finalmente, no se realiza el montaje del sistema completo por indisponibilidad y fallos de las impresoras 3D. Se monta los sensores MMA7341L y MPU6050 en la suspensión delantera y la caja con toda la unidad central.



Figura 67. Orientación de los ejes X e Y en el montaje real.

En la **figura 67** se recuerda la orientación de los ejes cardinales y se muestra los nuevos nombres para referirnos a los acelerómetros. **El sensor analógico MMA7341L se nombra como sensor A y el sensor digital MPU6050 como sensor D.** El sensor A se configura con un fondo de escala de $\pm 11G$ y el sensor D con $\pm 8G$. Se establece como frecuencia de muestreo 400Hz. Esta configuración es utilizada durante todas las pruebas.

A continuación se muestran unas imágenes del sistema final instalado en la bicicleta, *figura 68, figura69, figura 70.*



Figura 68. Posición real de los dispositivos en la bicicleta.

La unidad central se observa destaca por un recuadro azul y la batería externa por un recuadro amarillo.



Figura 69. Posición real acelerómetro MMA7341L en la bicicleta.



Figura 70. Posición real acelerómetro MPU6050 en la bicicleta.

Tras ver el montaje real sobre la bicicleta llegó el momento de la realización de pruebas de campo. Esto mismo se expone en el siguiente apartado.

5.2 Caracterización

5.2.1 Montaje con sensor de referencia

Se realiza un test para medir la señal de respuesta de la bicicleta ante un impacto. La prueba consiste en montar un acelerómetro capacitivo de referencia solidario a la parte baja de la suspensión delantera, es decir, en las botellas. Mediante el acondicionador de señal ajustamos la sensibilidad y la transformamos de $\mu\text{C/g}$ a mV/g . Una vez hecho esto se utiliza un osciloscopio que muestrea a su máxima velocidad de 100 MHz para asegurarnos de que captamos todo lo necesario. A continuación mediante un PC y el programa CleverScope realizamos el registro de datos.

Para esta prueba necesitamos los siguientes elementos:

- Acelerómetro Brüel&KjaerType 4371V
- Acondicionador de señal Brüel&KjaerNexus 2690
- Osciloscopio CS328A (con programa Cleverscope)
- Cables conexión y alimentación

El test consiste en levantar la rueda delantera del suelo y golpearla contra él bruscamente, sin estar montado en la bicicleta situado en un lado de ella. Las pruebas posibles se limitan por la conexión a través de los cables. Otra prueba realizada fue levantar la bicicleta con las dos manos y dejarla caer de forma que impacten las dos ruedas al mismo tiempo, la señal obtenida es similar a la obtenida golpeando solo la rueda delantera.

A continuación se muestra el montaje y dispositivos utilizados, *figura 71, figura 72.*



Figura 71. Montaje del acelerómetro.



Figura 72. Osciloscopio y acondicionador de señal.

5.2.2 Respuesta del sistema

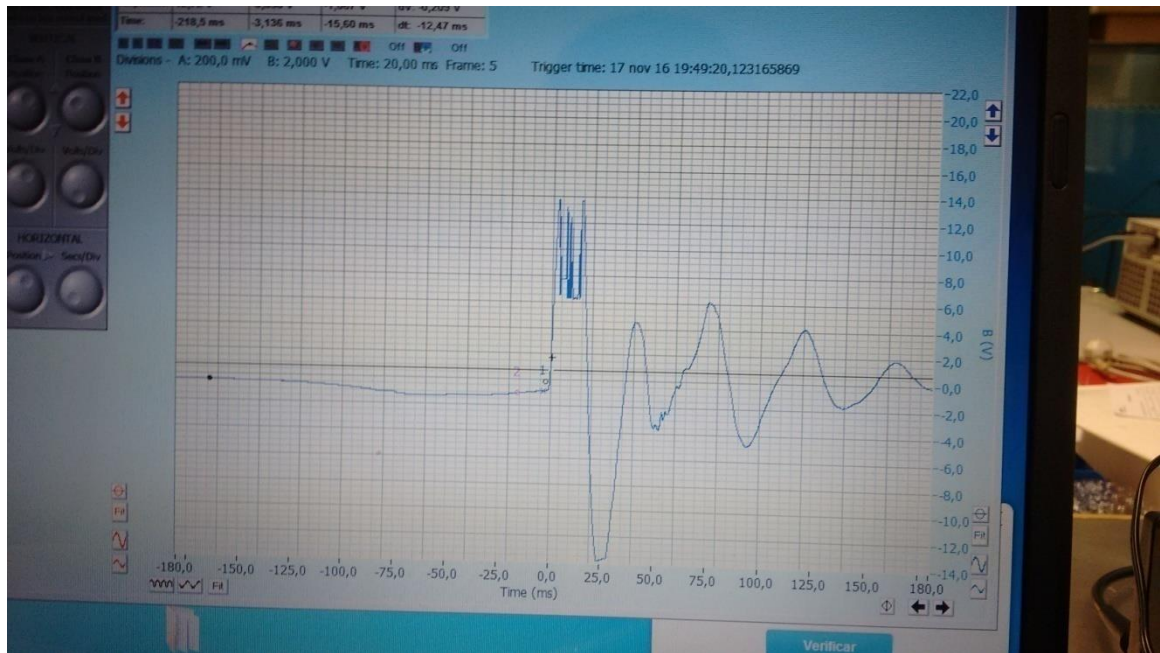


Figura 73. Señal obtenida en el acelerómetro de referencia.

Los resultados obtenidos, **figura 73**, muestran una señal cuyo periodo se aproxima a 30 ms. Esto quiere decir que estamos ante una señal cuya frecuencia es 30-40Hz. Al realizar el test con más fuerza cambiaba la amplitud de la señal pero la frecuencia era idéntica.

Realizando una prueba similar con nuestro sistema obtenemos los siguientes resultados. A continuación se muestran dos imágenes, una perteneciente al sensor A y otra del sensor D, **figura 74**, **figura 75**.

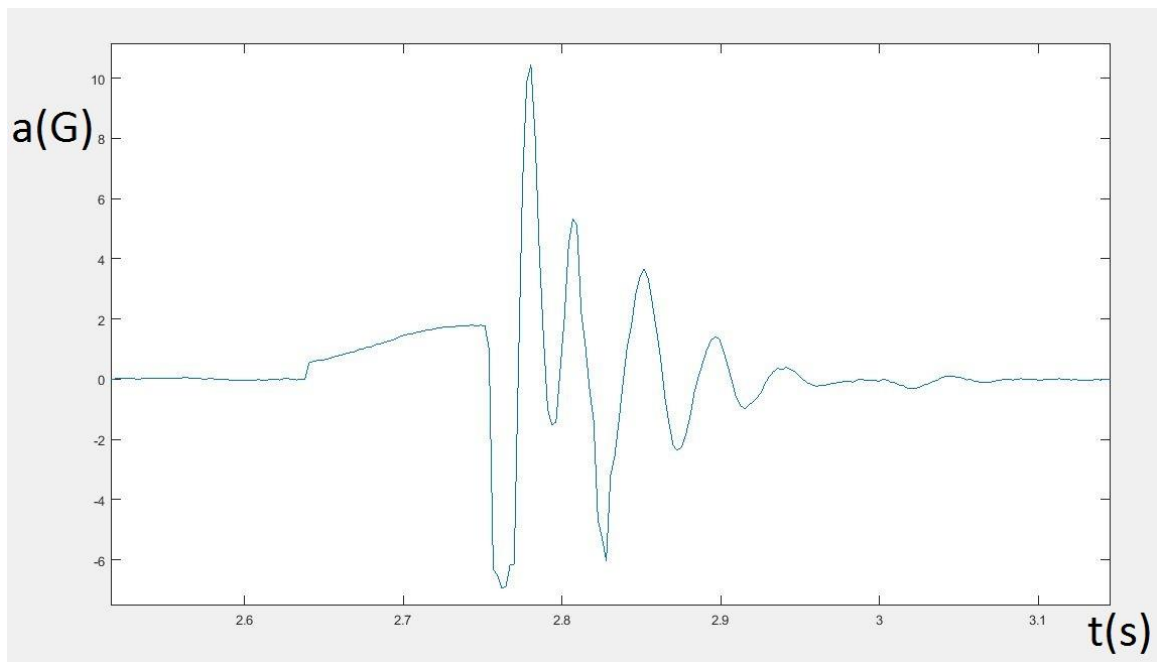


Figura 74. Resultados aceleración eje X en el sensor A en test de respuesta del sistema.

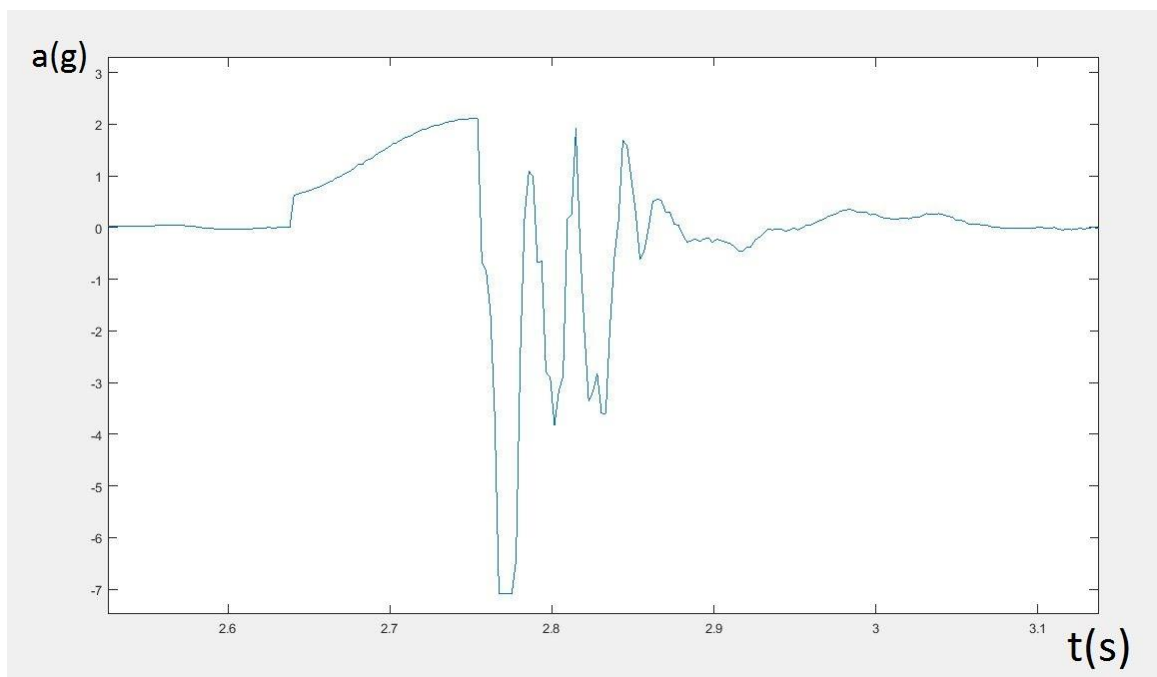


Figura 75. Resultados aceleración eje X en el sensor D en test de respuesta del sistema.

Como se puede ver ambas señales tienen un gran parecido en la frecuencia y oscilaciones de la señal registrada. El primer evento de aumento de aceleración que alcanza 2G es igual en ambos sensores ya que la rueda de la bicicleta se halla en el aire y esa aceleración es causada por la persona que genera el movimiento. Después, se observan

las oscilaciones producidas por el impacto y como en el caso del MPU6050 son de menor amplitud ya que la suspensión absorbe parte de la vibración.

La señal presenta un periodo comprendido entre 20-40Hz, no se puede establecer un periodo fijo ya que no es una señal periódica.

La señal registrada es muy similar al test realizado en el laboratorio con equipo profesional por lo que nuestro sistema es efectivo y válido.

La frecuencia de la señal esta comprendida entre 20-40Hz. Con una frecuencia de muestreo de 400Hz somos capaces de coger más de 10 puntos cumpliendo así el objetivo marcado para nuestro sistema.

Tras comprobar que nuestro sistema de instrumentación basado en acelerómetros cumple su cometido se realizan las siguiente pruebas en las que el ciclista ya está montado en la bicicleta y en marcha.

5.3 Pruebas de campo

5.3.1 Test con obstáculo definido

Se realiza un test en el que la bicicleta sobrepasa por encima de un único obstáculo a velocidad constante. Se realizan dos ensayos, uno a 12km/h y otro a 22km/h. El objetivo de esta prueba es generar unos datos de forma que se observe claramente la aceleración causada durante el impacto. Un esquema ilustrativo es el siguiente, *figura 76*.

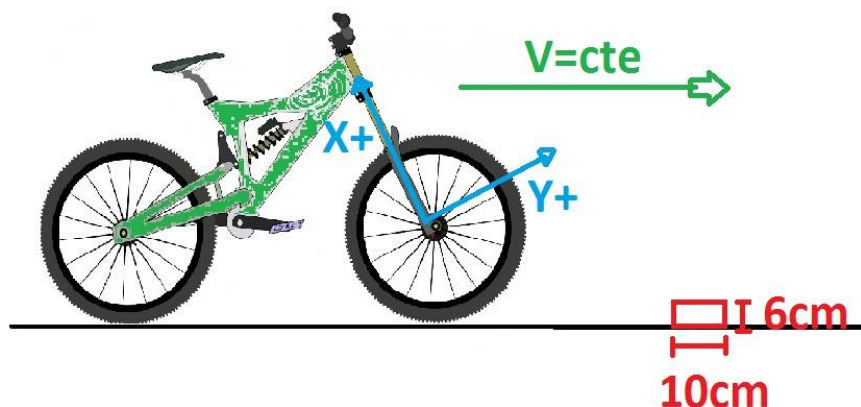


Figura 76. Esquema explicativo test de obstáculo definido.

El obstáculo es un ladrillo de 6 cm de alto, 10 cm de largo y 20 cm de profundidad. Se puede observar en la siguiente figura, *figura 77*.



Figura 77. Ladrillo usado como obstáculo en test.

A continuación se muestran los resultados del test a 12km/h (aproximadamente), *figura 78, figura 79, figura 80.*

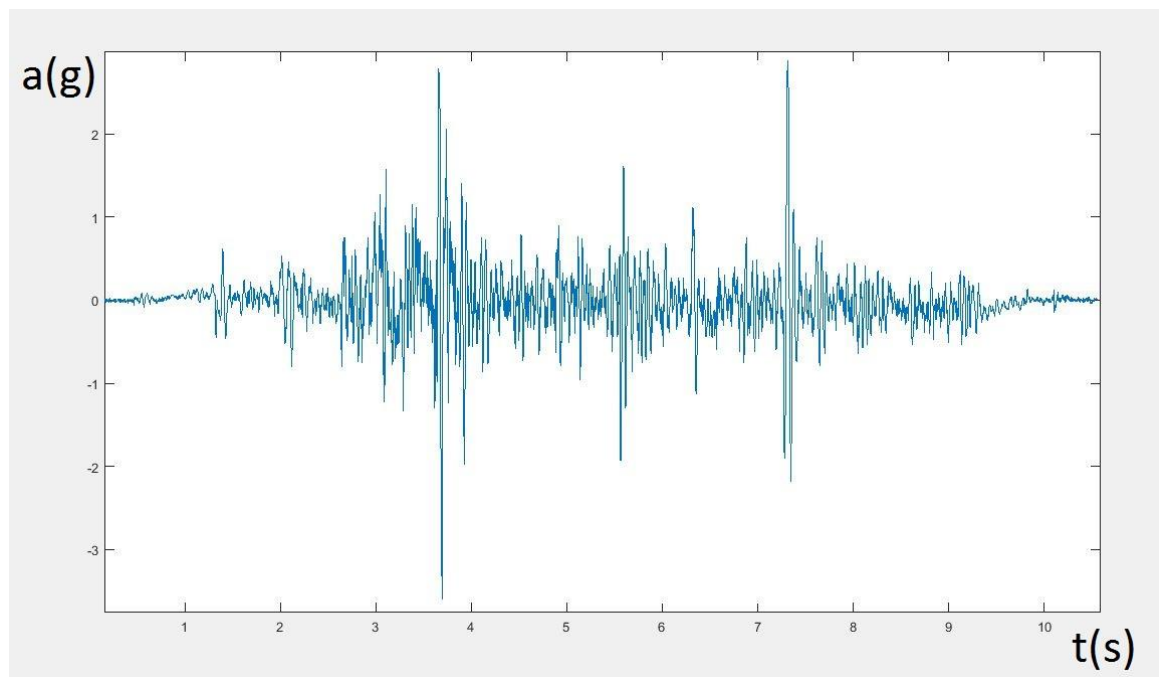


Figura 78. Resultados de aceleración sensor A en eje X en test de ladrillo a 12km/h.

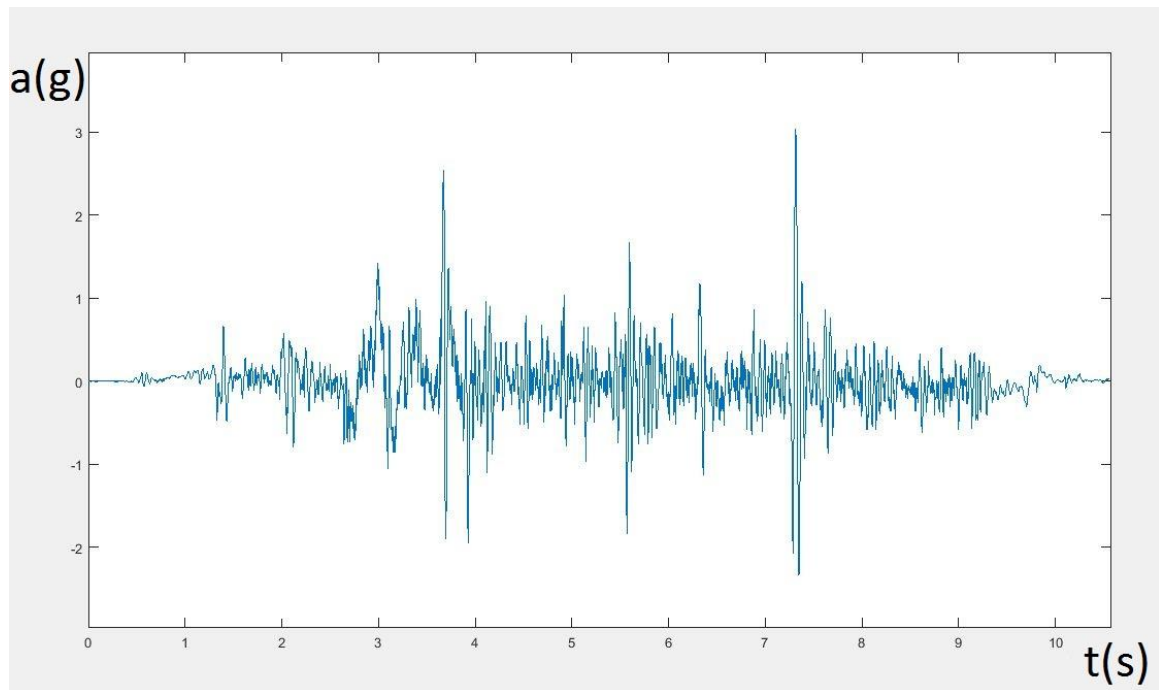


Figura 79. Resultados de aceleración sensor D en eje X en test de ladrillo a 12km/h.

Como se puede observar en la ilustración las aceleraciones son prácticamente iguales. El momento del impacto se produce en $t=3.65$ s. Antes del impacto la señal refleja unas oscilaciones causadas por un cambio de posición del piloto. En el impacto se aprecia que la suspensión absorbe parte de la energía, el acelerómetro A registra 6 G pico-pico mientras que el sensor D registra 4,5 G. Para ver esto más en detalle se muestra una fotografía del momento del impacto con ambos sensores representados, *figura 80*.

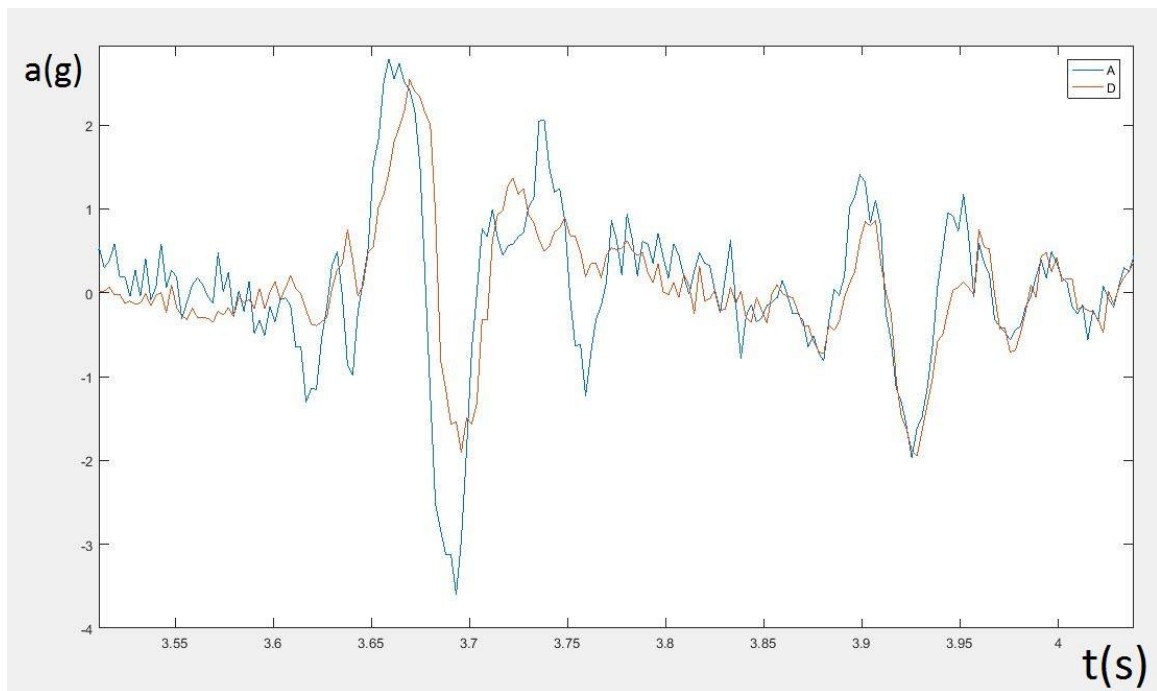


Figura 80. Resultados de aceleración ambos sensores en eje X en test de ladrillo a 12km/h.

El momento del impacto $t=3.65s$ se observa como genera una gran oscilación. La frecuencia de dicha oscilación es aproximadamente de 16 Hz y es registrada por ambos sensores. La señal roja medida por el sensor D se encuentra retrasada en el tiempo debido a la suspensión que atrasa el efecto del impacto. El máximo inferior se haya atenuado de casi desde -4G a -2G mientras que el superior es prácticamente igual. A baja velocidad el obstáculo causa primeramente un efecto de frenado hasta que la rueda delantera consigue superponerse a él. Tras sobrepasarlo la rueda delantera contacta con el suelo de nuevo se observa una nueva oscilación en el sensor A en $t=3.73s$. Posteriormente sucede el impacto de la rueda trasera en $t=3.87s$, se observa como repercute en la suspensión delantera un evento sucedido en la parte posterior de la bicicleta. La frecuencia de oscilación es aproximadamente 15Hz al igual que la sucedida en la rueda delantera.

A continuación se realiza el mismo ensayo aumentando la velocidad a $v= 22km/h$ (aproximadamente). Los resultados obtenidos son los siguientes *figura 81, figura 82, figura 83, figura 84, figura 85, figura 86.*

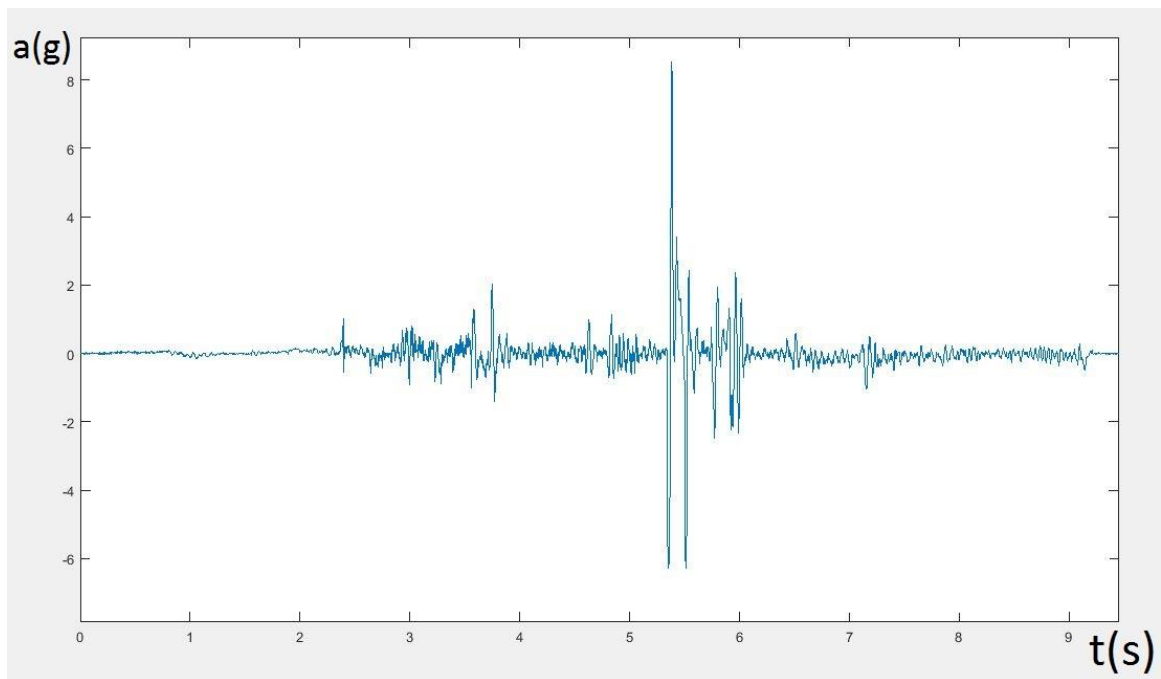


Figura 81. Resultados de aceleración sensor A en eje X en test de ladrillo a 22km/h.

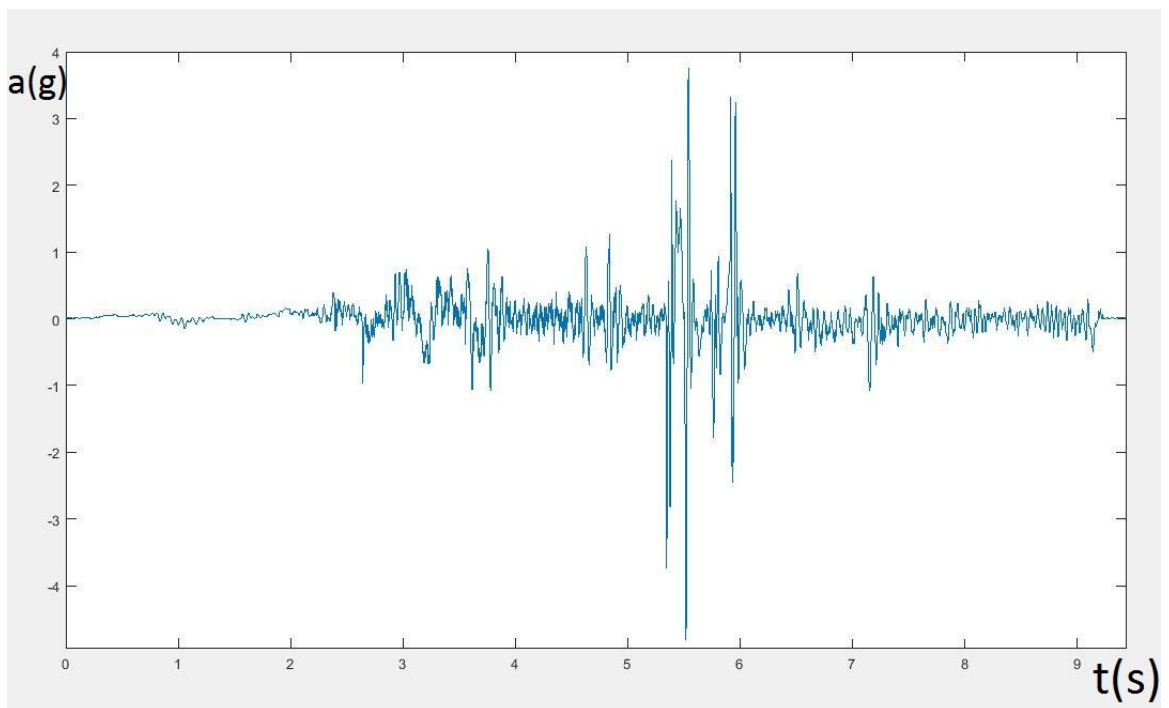


Figura 82. Resultados de aceleración sensor D en eje X en test de ladrillo a 22km/h.

Como se puede observar en los resultados las aceleraciones son de mayor amplitud que en el ensayo a 12km/h como era previsible y la frecuencia de oscilación es prácticamente la misma, aproximadamente 15Hz. El momento del impacto se produce en $t=5,33s$. El acelerómetro A registra 14,5 G pico-pico mientras que el sensor D registra 6 G. Para ver esto más en detalle se muestra una fotografía del momento del impacto con ambos sensores representados, *figura 83*.

Nuevamente queda reflejado el efecto de la suspensión trasera en la delantera. En el instante $t=5,75s$ la rueda trasera choca con el ladrillo y en el momento $t=5,95s$ toca el suelo. En la *figura 82* este evento es tan notable que se aproxima en magnitud al momento en el que la rueda delantera sobrepasa el ladrillo en el sensor D.

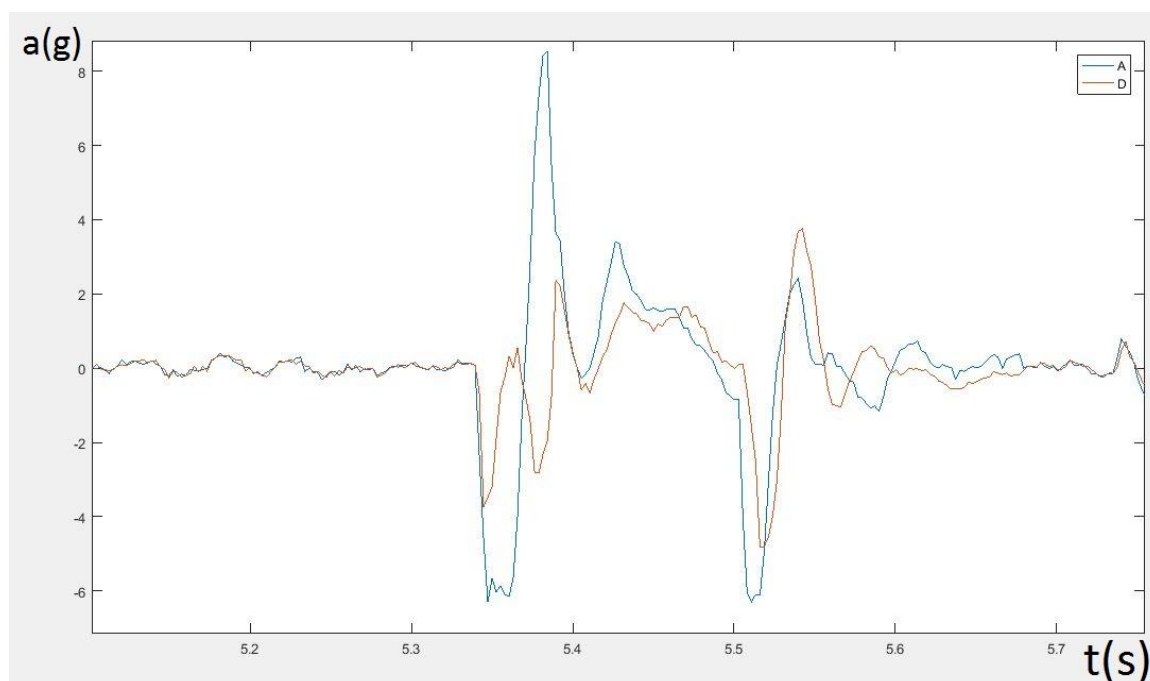


Figura 83. Resultados de aceleración ambos sensores en eje X en test de ladrillo a 22km/h.

En este caso al ir a mayor velocidad la suspensión se activa más y cómo podemos ver la atenuación que realiza es más efectiva que a 12km/h. Para aumentar la efectividad a baja velocidad deberíamos disminuir la regulación de compresión a baja velocidad y además comprobar que el SAG es el adecuado.

En el periodo negativo de la señal en el momento del impacto se atenúa de -6G a -3G y en periodo positivo se atenúa de 8G a 2G.

Después del impacto podemos ver otro impacto generado cuando la rueda delantera tras permanecer un tiempo en el aire por la elevación causa por el impacto con el ladrillo recupera el contacto con el suelo en $t=5,6s$. Se observa como la señal está desplazada en el tiempo pero la magnitud es semejante. En el caso del choque con el ladrillo la fuerza generada tiene una dirección vectorial muy similar a la dirección del desplazamiento de la

suspensión mientras que el suelo genera una fuerza totalmente vertical y causa que la suspensión no sea capaz de disipar la energía de forma eficiente. Un esquema ilustrativo de este evento es el siguiente, *figura 84, figura 85.*



Figura 84. Dirección vectorial de la fuerza causada por el impacto con un ladrillo.



Figura 85. Dirección vectorial de la fuerza causada por el impacto con el suelo.

El choque contra el suelo queda también registrado en el eje Y de forma muy evidente como podemos ver en la *figura 86.*

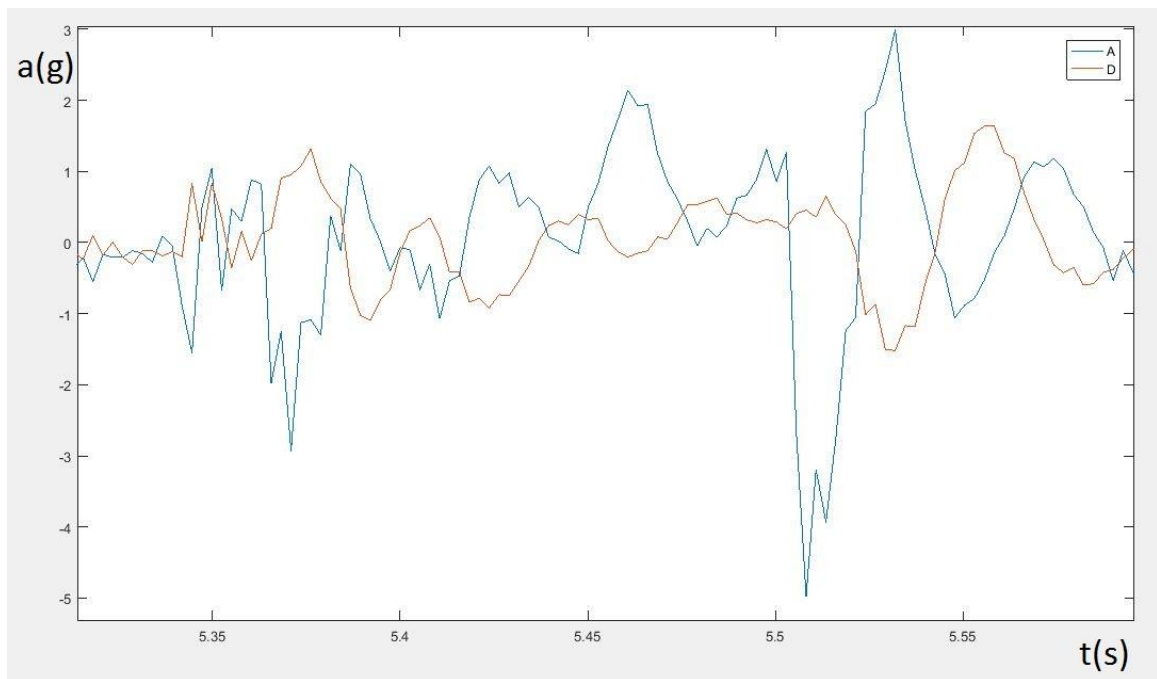


Figura 86. Resultados de aceleración ambos sensores en eje Y en test de ladrillo a 22km/h.

Se observa que en el instante de tiempo en el que la rueda choca contra el suelo $t=5,55s$ es más notable que incluso el impacto con el ladrillo, $t=5,33s$. El sensor D registra la misma señal atenuada y desplazada en el tiempo aproximadamente 25ms. La responsable de este fenómeno es la flexión material que sufren las barras de la suspensión

Gracias a la observación del eje Y podemos diferenciar los diferentes eventos que suceden. Además el eje Y es un indicativo de la fatiga material que puede sufrir la suspensión. Esto es una herramienta muy potente ya que tras realizar un descenso las marcas de suspensión pueden utilizar los datos pertenecientes al eje Y como test de fatiga de material en un laboratorio para evaluar nuevos prototipos o incluso los modelos actuales que tienen en el mercado.

5.3.2 Test en circuito de descenso

En este test se realiza un descenso en un circuito de categoría nacional. El circuito se encuentra en Morata de Tajuña, Madrid y durante 4 años se celebraron competiciones allí.

El descenso cuenta con saltos, con zonas escarpadas con piedras, con baches y curvas peraltadas. La duración aproximada es de 2 min. Una imagen del recorrido es la siguiente, *figura 87*.



Figura 87. Recorrido descenso de Morata de Tajuña.

A continuación se muestran los resultados obtenidos durante el descenso, *figura 88*, *figura 89*.

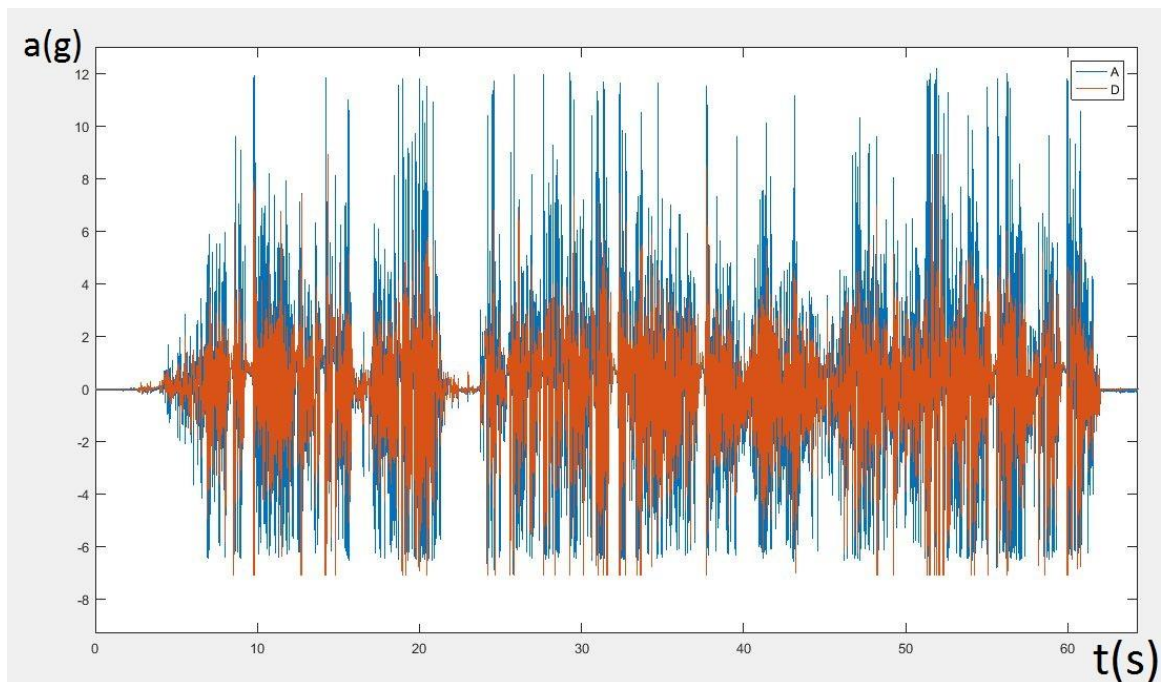


Figura 88. Resultados de aceleración sensor A y D ambos en eje X en test de circuito descenso.

Se registran datos durante todo el recorrido con una duración de 65s. Los eventos más fuertes se localizan cuando la aceleración registrada es mayor alcanzando una amplitud pico a pico de 18G. El sensor D por lo general representa una atenuación de lo registrado por el sensor analógico. En los casos extremos llega a registrar 16G pico-pico.

En los momentos de tiempo en los que la aceleración es aproximadamente 0 corresponden a los saltos. Por ejemplo en los instantes $t=8s$ y $t=9s$. El instante $t=23s$ es una excepción y corresponde al encuentro con otro ciclista y la realización de un adelantamiento seguro.

Este tipo de test requiere de un análisis en detalle de los eventos a estudiar cómo pueden ser los saltos o zonas específicas del descenso (zona de rocas, zonas muy pronunciadas).

A continuación se representa una imagen con los resultados obtenidos en el eje Y durante este mismo test, *figura89*.

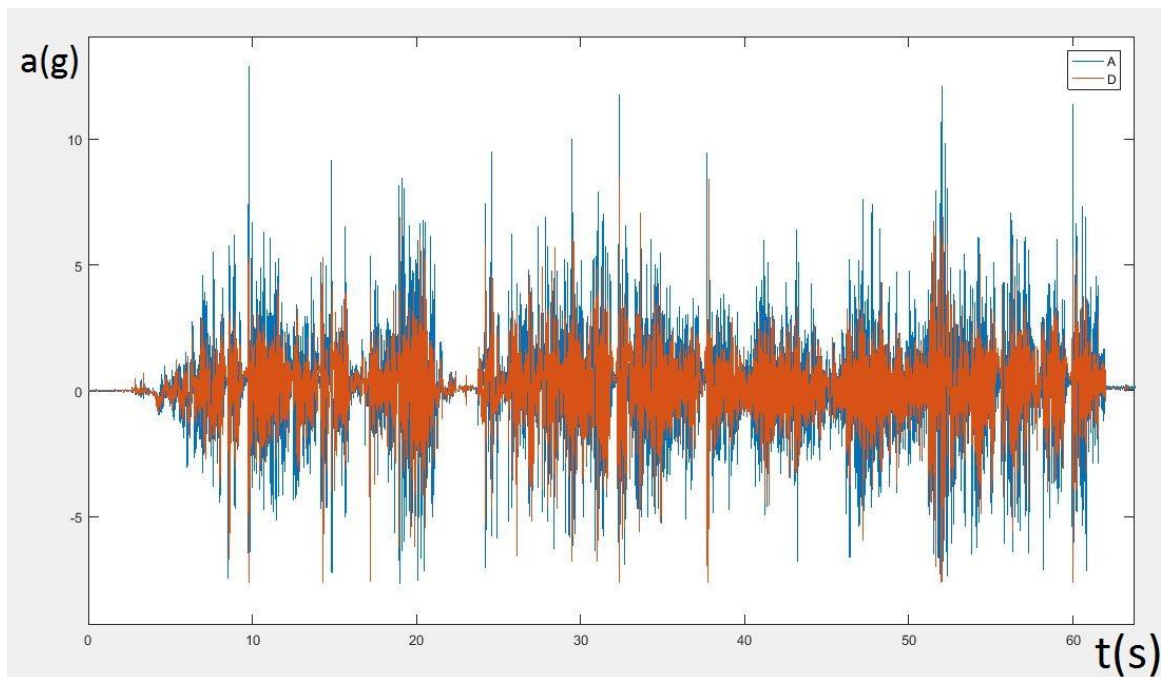


Figura 89. Resultados de aceleración sensor A y D ambos en eje Y en test de circuito descenso.

Como se puede observar hay picos de aceleración positiva que alcanzan en el sensor A los 11G y en los periodos negativos se alcanzan los 8G. La frecuencia con la que ocurren estos momentos de amplitud máxima es menor que en el eje X y ocurren tras los saltos. Una prueba de ello son los momentos $t=9s$, $t=33s$ y $t=60s$.

En este test nos hemos enfrentado a una prueba real y hemos sido capaces de recoger datos durante toda la prueba sin que exista ningún fallo en el sistema.

Se puede cuestionar si la suspensión es efectiva o no tanto como debería puesto que la señal recogida por el sensor MPU6050 sigue muy de cerca a la señal MMA7141L. Esta hipótesis se formula a partir de los resultados obtenidos junto con la opinión del piloto que percibe que las vibraciones fuertes causadas por las piedras llegan al manillar.

Capítulo 6 Conclusiones y trabajo futuro

En este capítulo se presentan las conclusiones sobre el sistema de instrumentación diseñado junto con la propuesta de ampliaciones y mejoras futuras del mismo.

6.1 Conclusiones

En este proyecto se ha conseguido el objetivo propuesto de realizar el diseño e implementación de un sistema de instrumentación basado en cuatro acelerómetros para la monitorización de la suspensión de una bicicleta en circuitos de descenso.

El sistema es capaz de adquirir datos con una frecuencia de refresco de hasta 730Hz casi el doble del planteamiento inicial y muy superior a lo necesario para registrar correctamente las oscilaciones de aceleración producidas en las suspensiones de la bicicleta. La autonomía del sistema supera las expectativas iniciales alcanzando 32,5 h de funcionamiento ininterrumpido. El consumo es 76mA en la práctica, inferior al consumo teórico empleado en el dimensionamiento de la batería.

La capacidad de almacenamiento de datos es de 1GB permitiendo hasta 12h de registro de datos utilizando dos sensores a 400Hz.

Los soportes diseñados para los sensores se adaptan perfectamente a la bicicleta y ofrecen una sujeción firme y segura. Son muy fáciles de instalar y de desmontar ya que usan bridas que se manipulan sin herramientas.

Las pruebas de campo han corroborado que el sistema funciona correctamente en situaciones reales y han aportados datos con gran cantidad de información sobre el funcionamiento de las suspensiones.

El sistema de instrumentación final requiere más desarrollo para llegar a ser semejante a un sistema comercial debido a que le falta mejorar el interfaz con el usuario así como los algoritmos que reconozcan cuándo un reglaje de la suspensión es erróneo. A pesar de esto es relativamente sencillo regular la suspensión a partir de los datos obtenidos con el sistema en un test de obstáculo conocido.

6.2 Trabajo futuro

Las marcas comerciales de dispositivos auxiliares para el ajuste de suspensiones han desarrollado sus productos durante años y han contado con la ayuda de profesionales del ciclismo para optimizar su funcionamiento. Nuestro sistema apenas ha realizado pruebas de campo y se encuentra en fase de desarrollo.

En esta fase se ha diseñado e implementado la instrumentación de a bordo formada por varios acelerómetros monitorizados por un sistema micro-controlador cuyos datos pueden exportarse para su posterior análisis. Para completar su funcionalidad como sistema de telemetría de una bicicleta de descenso se plantean las siguientes ampliaciones y mejoras:

1. Interfaz con dispositivos móviles
2. Reducción de costes

Adicionalmente, es necesario ampliar el número de ensayos e integrar la información procedente de su uso en diferentes terrenos y en una colección amplia de circuitos profesionales. Esta labor vendría facilitada a través de extender su uso.

Implementar una comunicación inalámbrica

Nuestro sistema es capaz de recoger los datos y almacenarlos en una tarjeta microSD que posteriormente puede exportarse de forma sencilla a un PC. En cambio, lo que un usuario preferiría actualmente es poder acceder a los datos en cualquier lugar y en cualquier momento. Una solución viable es añadir una comunicación Bluetooth al sistema a través de la cual los datos se envíen a un teléfono móvil. Un Smartphone de hoy en día tiene una alta capacidad de procesamiento por lo que puede recibir los valores de los sensores en tiempo real y procesarlos.

La implementación necesaria para lograr una comunicación Bluetooth mediante Arduino es añadir un **módulo Bluetooth HC-06**. Dicho dispositivo se comunica con el micro-controlador vía serie.

Una vez el hardware está listo es necesario realizar una aplicación para el Smartphone que se encargue de recibir y procesar los datos. Para sacarle aún más partido se pueden implementar funciones como encendido, apagado y pausa del sistema desde el móvil y otras de control y análisis. Esta mejora del sistema no aumenta su coste notablemente.

Sustituir los acelerómetros analógicos

El sistema diseñado cuenta con dos acelerómetros analógicos ya que permiten cubrir las distancias de casi 1m desde el sensor hasta la unidad central. Ahora bien, para realizar la transmisión de datos de forma estable y segura se emplea cables coaxiales y conectores SMA y se han fabricado PCBs para adaptar los al sensor. Esto conlleva elevar el coste del proyecto notablemente.

Una alternativa eficaz es conseguir que un sensor con interfaz digital sea capaz de transmitir datos desde una distancia de 1m sin que presente problemas de comunicación. Para conseguir esto existen dispositivos capaces de extender el bus I2C tanto en número de aparatos conectados como en distancia. Un ejemplo de ello es el dispositivo **P82B715**.

Con esta mejora se consigue reducir el coste material del proyecto así como mayor versatilidad gracias al empleo de acelerómetros digitales configurables.

Presupuesto

En este apartado se detalla una aproximación de los costes de realización de este trabajo fin de grado. Así mismo, también se expresa la duración de las diferentes fases y procesos.

Diagrama de Gantt

Se expone gráficamente mediante un diagrama de Gantt el tiempo de dedicación a cada subproceso de este trabajo de fin de grado expresado en semanas, *figura 90, figura 91.*



Figura 90. Diagrama de Gant semana 1 hasta semana 19.

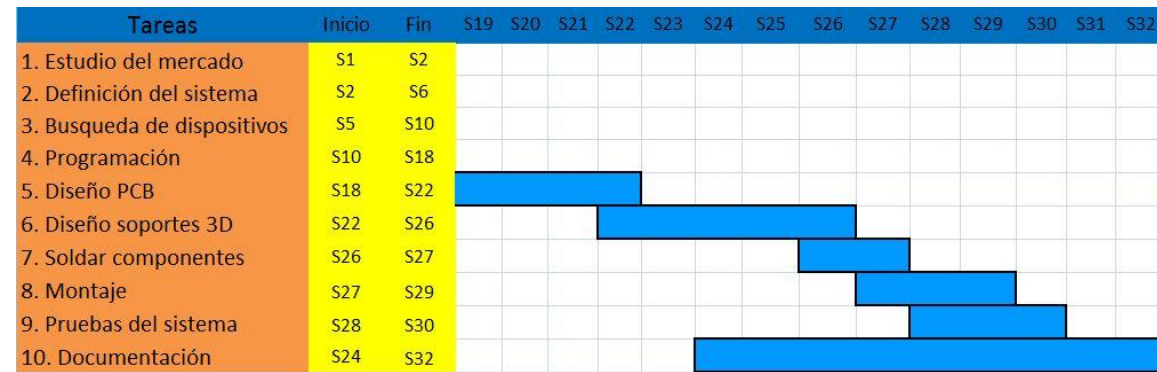


Figura 91. Diagrama de Gant semana 19 hasta semana 32.

Presupuesto

En este apartado se expresa el coste del proyecto en dos partes: una parte en la que se detalla el coste de elaboración física del sistema de instrumentación, *tabla 8*, y otra parte con el coste de personal, *tabla 9*.

Código	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
1.1	Arduino Due Micro-controlador basado en 32 bit ARM 84MHz. Voltaje de trabajo 3.3V	1	33,29€	33.29€
1.2	Módulo microSD Módulo lector de tarjetas microSD con salida I2c.	1	0.52€	0,52€
1.3	LCD HD44780+módulo I2C Pantalla LCD 16x2 con módulo que permite comunicación I2C.	1	1,95€	1,95€
1.4	Cables “jumper wires” Pack 120 cables de 15 cm.	1	2,71€	2,71€
1.5	Conector jack 2.1mm Pack 5 conectores jack 2.1x5mm.	1	0,96€	0,96€
1.6	IMU MPU6050 Acelerómetro y giróscopo triaxial con salida I2C.	2	1,84€	2,68€
1.7	Acelerómetro MMA7341L Acelerómetro analógico triaxial. Escala configurable a +-3G y +-11G.	2	12,59€	25,18€
1.8	Batería Woxter 2600 SR Batería externa para dispositivos portátiles de 2600mAh.	1	12,99€	12,99€
1.9	MicroSD Sandisk 1GB Tarjeta de memoria microSD 1GB.	1	2,99€	2,99€
1.10	Caja transparente Caja de 12x8x5,5 cm en la que se aloja el Arduino Due, la pantalla LCD, el módulo microSD y la PCB alimentación.	1	0,80€	0,80€
1.11	SMA conector de borde Conector SMA para borde de PCB. Ref. en RS 526-5757.	4	6,92€	27,68€
1.12	SMA conector de panel Conector SMA para panel. Ref. en RS 512-0036	4	5,61€	22,44€

1.13	Cable SMA Cable coaxial SMA 1 m. Ref en RS 526-0308.	4	17,78€	71,12€
1.14	Conector terminal Conector terminal de 5mm de paso. Ref. en RS 425-8720.	5	0,19€	0,95€
1.15	Conector Molex Conector macho para PCB Molex. Ref. en RS 679-5515.	10	0,12€	1,20€
1.16	Carcasa Molex Carcasa hembra conector Molex. Ref. en RS 679-5173.	10	0,06€	0,60€
1.17	Crimprado Molex Contacto de crimprado Molex. Ref. en RS 763-1033.	100	0,06€	6,00€
1.18	PCBS Fabricación de las PCBS usadas en este proyecto.	2	13,95€	27,90€
1.19	Soportes de plástico 3D Impresión de los soportes 3D en los que se alojan los acelerómetros.	4	24,20€	96,80€
1.20	Técnico soldador Persona que suelda todos los elementos necesarios. Tarifa expresada en 12€/h.	2	12€/h	24,00€
1.21	Material auxiliar Material auxiliar como por ejemplo bridas, termo fusible, tornillos.	1	18,00€	18,00€
TOTAL				380,76€

Tabla 8. Costes de elaboración física del sistema de instrumentación.

Como se puede observar los campos de mayor coste son los cables coaxiales y la impresión 3D de los soportes. Ambos juntos suponen un 44% del coste total.

Todos los programas usados tienen licencia gratuita o licencia de estudiante por lo que su coste es 0€ y no aparecen en el presupuesto.

A continuación se detallan los costes de personal concebidos en este proyecto, *tabla 9*.

Categoría	Horas/día	Días	Total horas	€/h	Coste
Estudiante ingeniero industrial electrónico	4	90	360	16,50	5940,00€
Doctor, tutor	2	10	20	28,00	560,00€
Total					6500,00€

Tabla 9. Costes de los salarios de personal.

Finalmente el coste total del proyecto teniendo en cuenta los dos costes calculados asciende a seis mil ochocientos ochenta euros con setenta y seis céntimos, 6880,76€.

Glosario

BMX: Bicycle motocross
CMOS: Complementary metal oxide semiconductor
IMU: Inertial measurement unit
LCD: Liquid crystal display
LIPO: Lithium polymer (batería)
LVDT: Linear variable differential transformer
MEMS: Microelectromechanical systems
PC: Personal computer
PCB: Printed circuit board
PIC: Peripheral interface controller
PWM: Pulse width modulation
SAG: Prehundimiento de la suspensión (bajo el peso del ciclista)
SMA: Subminiature versión A
TFG: Trabajo fin de grado
TTL: Transistor-transistor-logic

Bibliografía

- [1] Azorín, J.: `Sistema de control para un modelo de bicicleta estable de forma autónoma.`. Proyecto fin de carrera, Universidad Carlos III, 2011
- [2] <http://www.girolarevista.cl/index.php/tendencias/item/136-la-evolucion-de-la-bicicleta>, Accedido en Febrero 2017
- [3] SRAM: `*Rockshox suspension theory guide [archive PDF]*` . Recuperado de http://www.sram.com.cn/sites/default/files/techdocs/rockshox_suspension_theory_10-replica.pdf.
- [4] <http://linkagedesign.blogspot.com.es/>, Accedido en Febrero 2017
- [5] <http://www.vitalmtb.com/photos/features/PIT-BITS-2013-Andorra-World-Cup,5645/Remi-Thirions-Commencal-with-Data-Acquisition-System-on-BOS-Suspension-at-Andorra,59916/sspomer,2> , Accedido en Febrero 2017
- [6] <http://www.parayelectro.com/products/BDL/>, Accedido en Febrero 2017
- [7] <https://devpost.com/software/picorico-fylou>, Accedido en Febrero 2017
- [8] <http://j-techsuspension.co.uk/pages/data-logging>, Accedido en Febrero 2017
- [9] <https://www.youtube.com/watch?v=4BRbtkiW2tg>, Accedido en Febrero 2017
- [10] <http://www.sussmybike.com/>, Accedido en Febrero 2017
- [11] <https://www.shockwiz.com/>, Accedido en Febrero 2017
- [12] Ruiz Montalvo, A: `Sistema automatizado para la calibración de acelerómetros según la norma ISO 16063-21:2003.`. Proyecto final de carrera, Universidad Politécnica de Cataluña, 2010
- [13] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4966/fichero/e.+Tecnologia+MEMS.pdf>, Accedido en Febrero 2017
- [14] Vara Rodríguez, D: `Sistemas para determinar la posición y orientación de herramientas quirúrgicas en operaciones de cirugía laparoscópica.`. Proyecto final de carrera, Universidad de Valladolid, 2014
- [15] <http://g-se.com/es/biomecanica/blog/fuerza-de-impacto>, Accedido en Febrero 2017
- [16] Sánchez Reillo, R. y Suárez Pascual, J. E.: `Lesson 6: Synchronous serial communication.` , Universidad Carlos III, España, 2015.
- [17] <http://www.monografias.com/trabajos12/microco/microco.shtml>, Accedido en Febrero 2017

- [18] <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardDue>, Accedido en Febrero 2017
- [19] <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>, Accedido en Febrero 2017
- [20] Sizemore, J., and Mueller, J. P.: `MATLAB for Dummies', (For Dummies, 2014)
- [21] Palacios, F. :`Métodos Numéricos: Resumen y ejemplos. Tema 3: Integración numérica.'. Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2008.
- [22] Torrente Artero, O.: `Arduino: curso práctico de formación', (RC Libros, 2013)

Anexos

Anexo 1. Planos acotados del soporte para la horquilla del acelerómetro MMA7341L

A continuación se exponen los planos acotados, *figura 92*, *figura 93*, *figura 94*, *figura 95*, en detalle del diseño 3D usado como soporte del acelerómetro MMA7341L. La figura se compone de dos partes, la base y la tapa. A su vez de cada una de estas dos se representan dos proyecciones, alzado y planta, para poder realizar una acotación completa. (La escala mostrada no es real ya que las imágenes se han modificado en tamaño; todas la medidas que aparecen están mediad en [mm]).

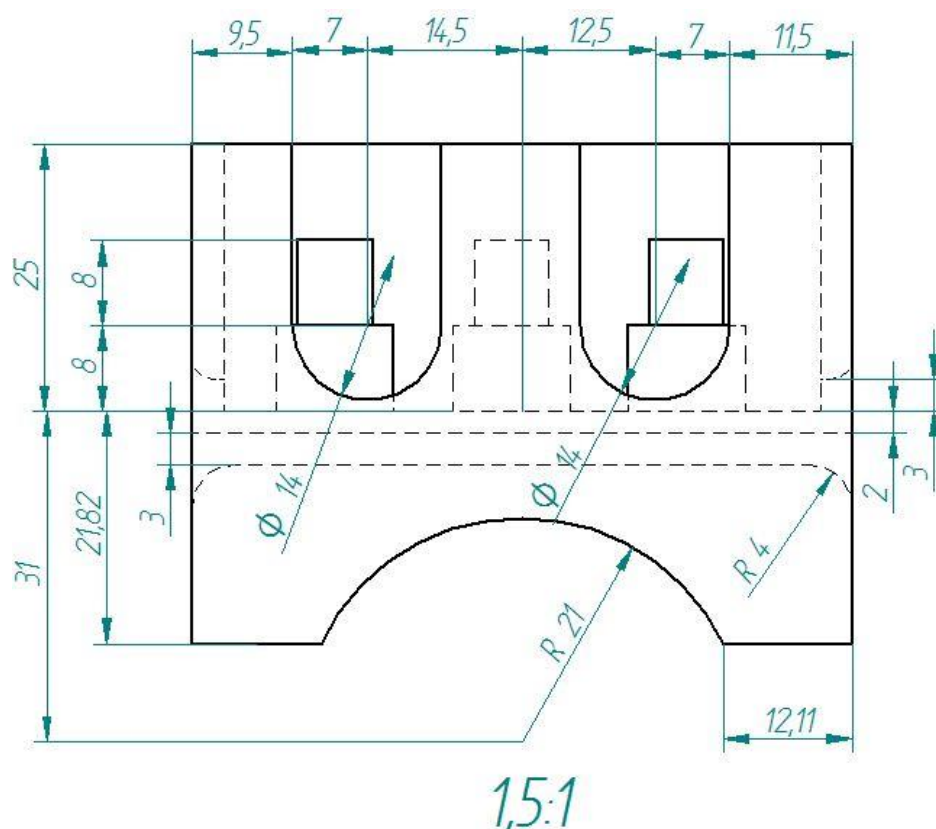


Figura 92. Alzado de la base para el sensor MMA7341.

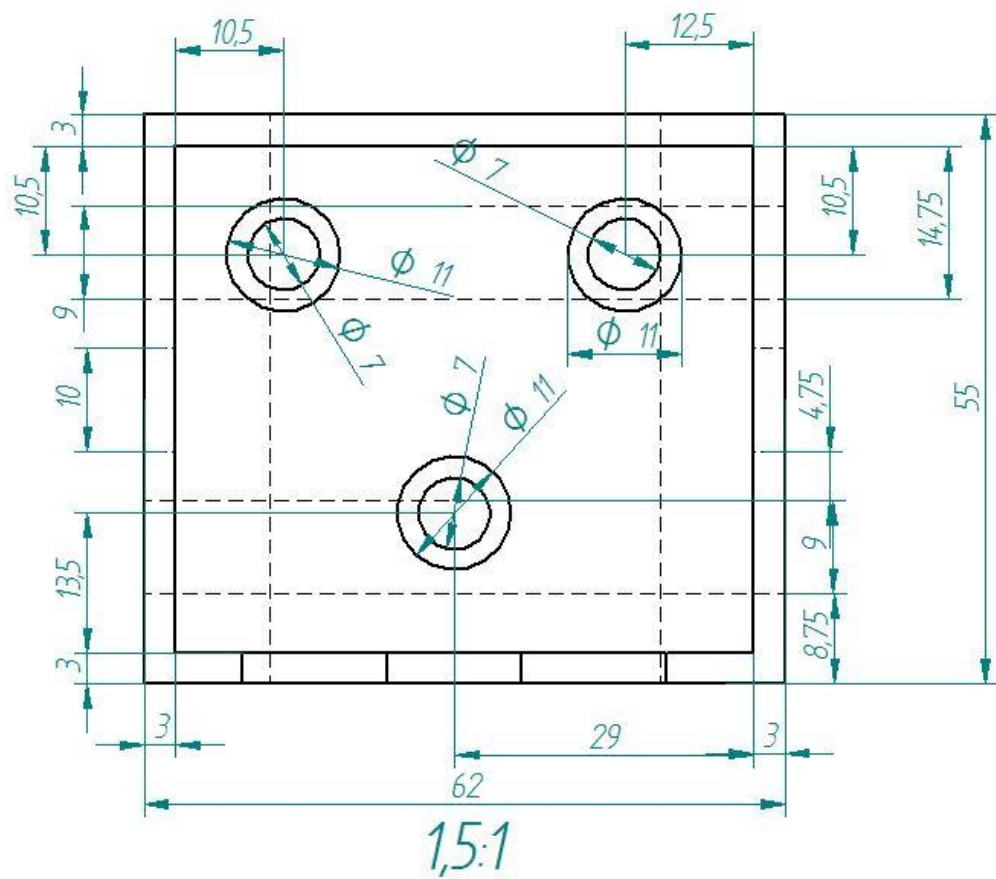


Figura 93. Planta de la base para el sensor MMA7341.

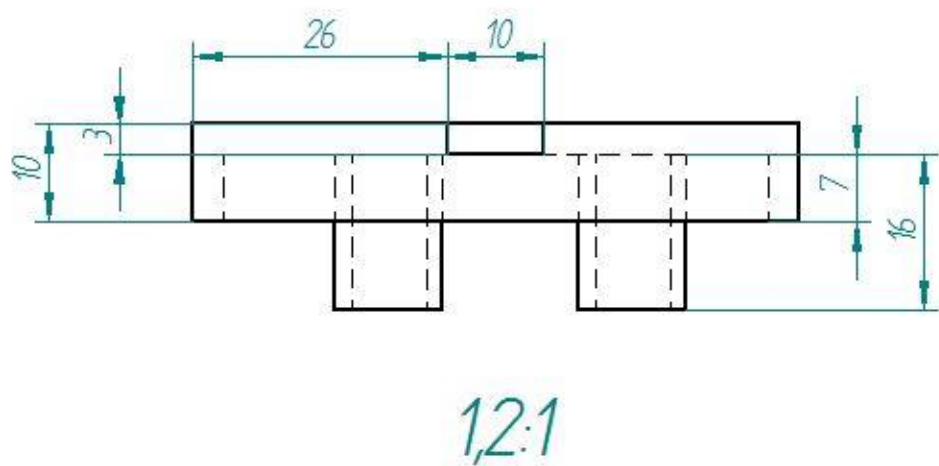


Figura 94. Alzado de la tapa para el sensor MMA7341.

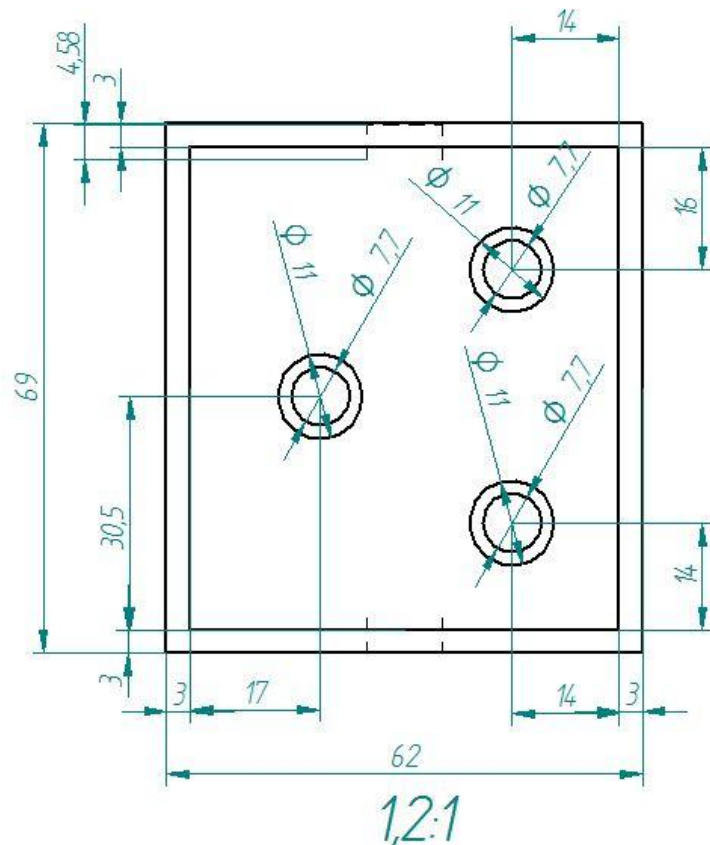


Figura 95. Vista inferior de la tapa para el sensor MMA7341.

Anexo 2. Planos acotados del soporte para la horquilla del acelerómetro MPU6050

A continuación se exponen los planos acotados, *figura 96*, *figura 97*, *figura 98*, *figura 99*, en detalle del diseño 3D usado como soporte del acelerómetro MPU6050. La figura se compone de dos partes, la base y la tapa. A su vez de cada una de estas dos se representan dos proyecciones, alzado y planta, para poder realizar una acotación completa. (La escala mostrada no es real ya que las imágenes se han modificado en tamaño; todas las medidas que aparecen están en [mm]).

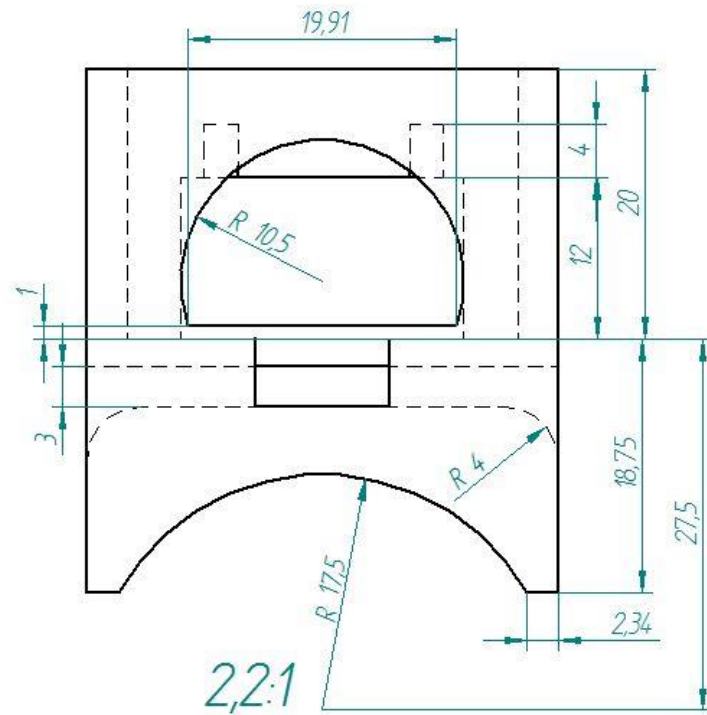


Figura 96. Alzado de la base para el sensor MPU6050.

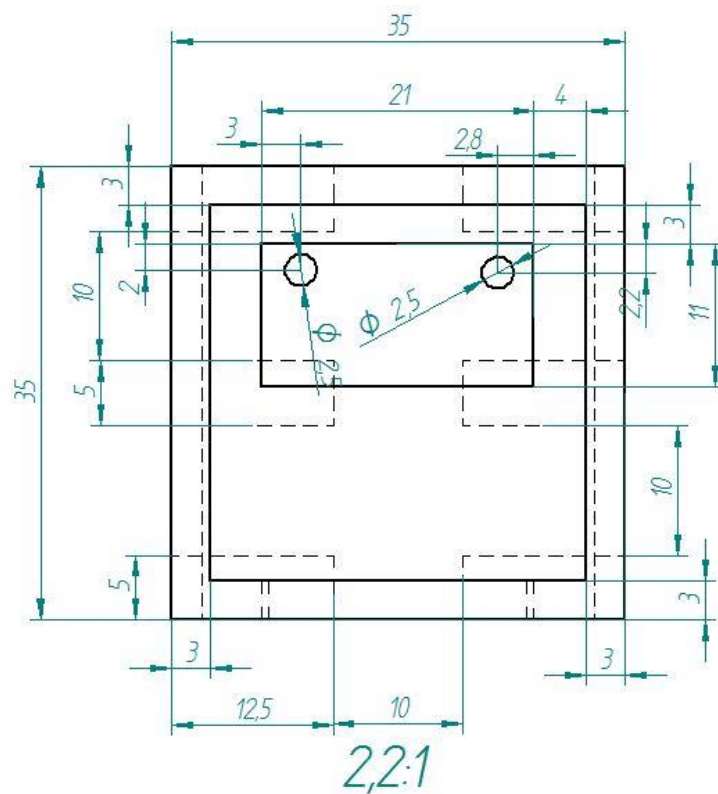


Figura 97. Planta de la base para el sensor MPU6050.

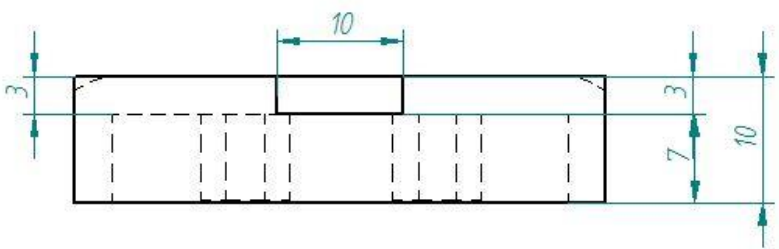


Figura 98. Alzado de la tapa para el sensor MPU6050.

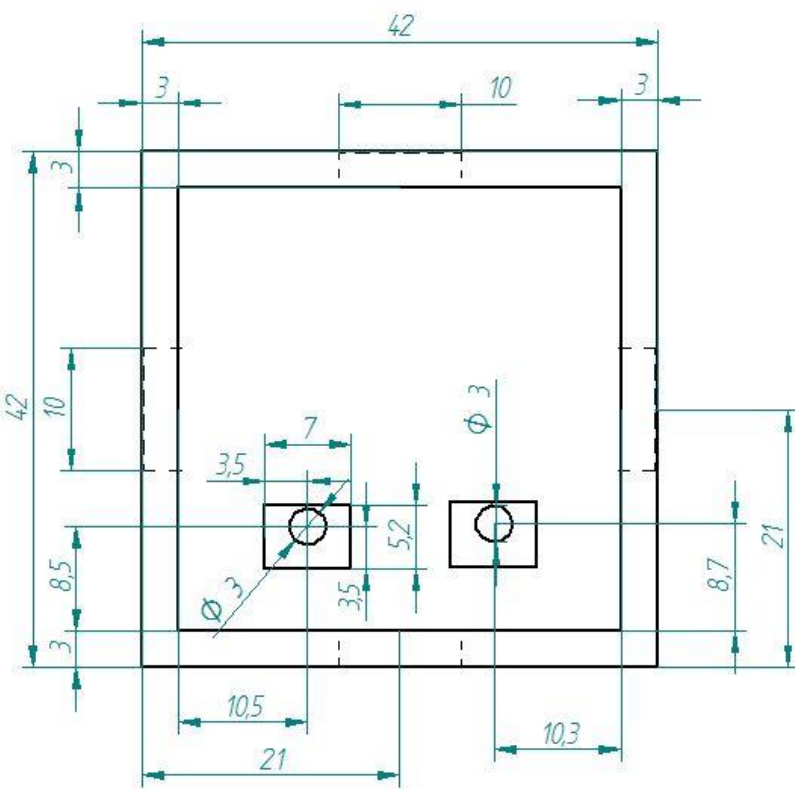


Figura 99. Vista inferior de la tapa para el sensor MPU6050.

Anexo 3. Planos acotados del soporte para el chasis del acelerómetro MMA7341L

A continuación se exponen los planos acotados en detalle del diseño 3D usado como soporte del acelerómetro MMA7341L en el chasis en la parte inferior cerca del eje de la rueda trasera. La figura se compone de dos partes, la base y la tapa. La tapa es exactamente igual que la descrita en el **Anexo 1** y las medidas de la caja donde se aloja el sensor también. Por ello en los siguientes planos, **figura 100 y figura 101** solo se acotan las medidas relativas a la cara de la base en contacto con la bicicleta. (Todas las medidas que aparecen están medidas en [mm]).

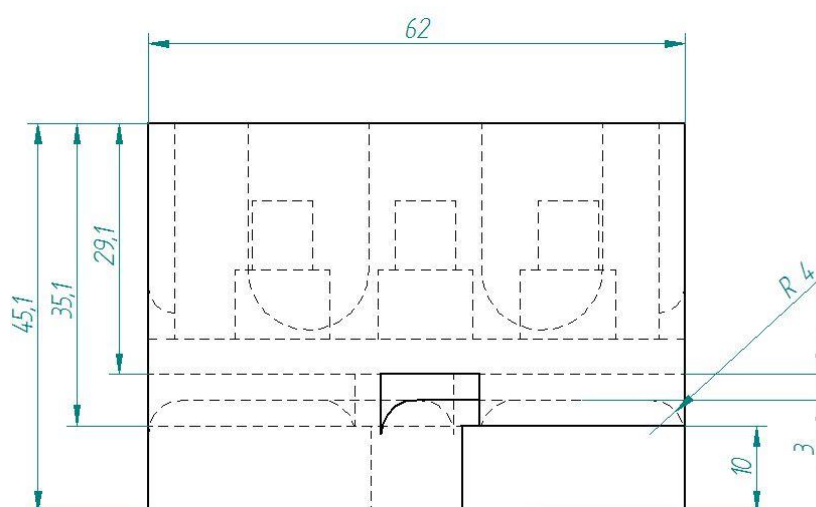


Figura 100. Alzado de la base del sensor MMA7341 para montaje en chasis.

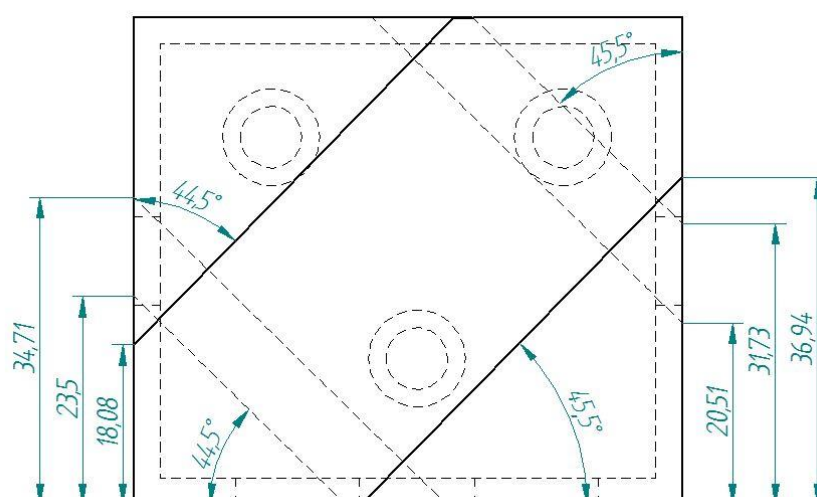


Figura 101. Vista inferior de la base del sensor MMA7341 para montaje en chasis.

Anexo 4. Planos acotados del soporte para el chasis del acelerómetro MPU6050

A continuación se exponen los planos acotados en detalle del diseño 3D usado como soporte del acelerómetro MPU6050 en el chasis en la parte superior cerca del sillín. La figura se compone de dos partes, la base y la tapa. La tapa es exactamente igual que la descrita en el *Anexo 2* y las medidas de la caja donde se aloja el sensor también. Por ello en los siguientes planos, *figura 102 y figura 103* solo se acotan las medidas relativas a la cara de la base en contacto con la bicicleta. (Todas las medidas que aparecen están medidas en [mm]).

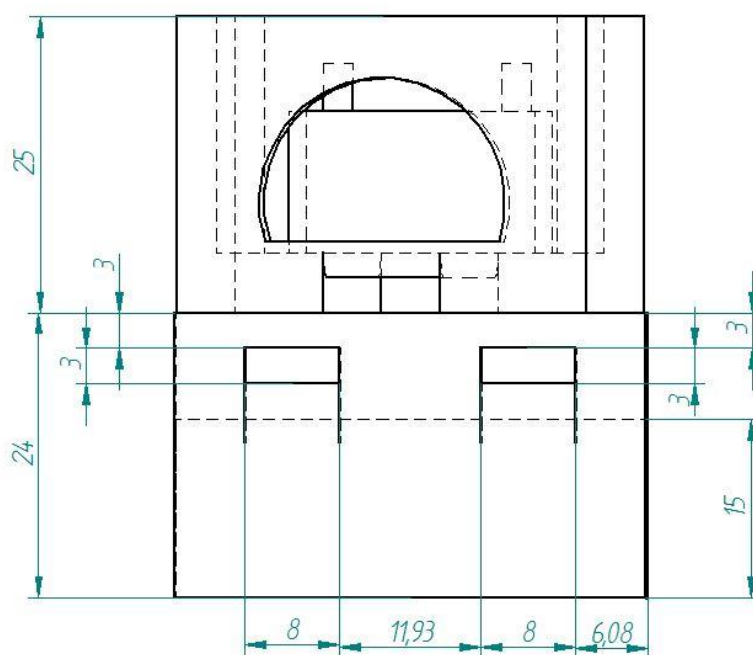


Figura 102. Alzado de la base del sensor MPU6050 para montaje en chasis.

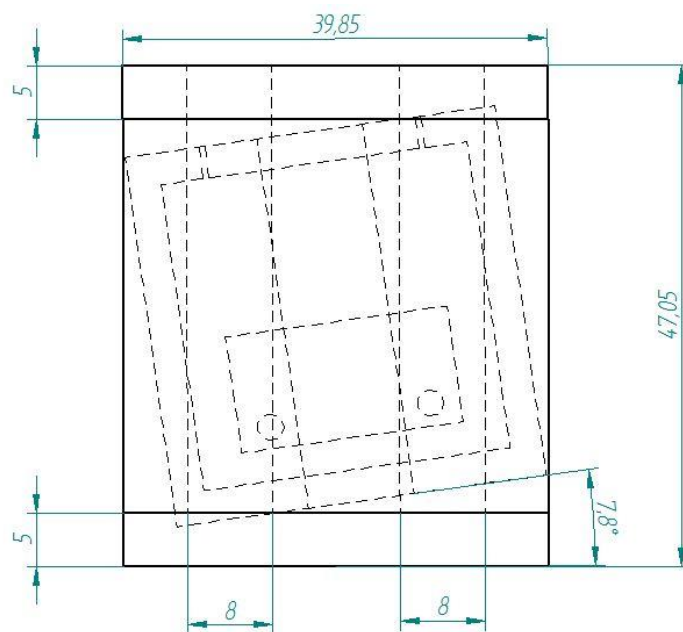


Figura 103. Vista inferior de la base del sensor MMA7341 para montaje en chasis.

Anexo 5. Tipos de bicicleta

Ciclismo en ruta

Se realiza sobre carreteras, es decir, sobre asfalto. El nivel de exigencia es moderado. Se caracteriza por recorrer grandes distancias. Se disputan las siguientes pruebas:

- Clásicas o pruebas de línea de un día
- Carrera por etapas: es la competición más conocida. Destaca la Vuelta España, el Giro de Italia y el Tour de Francia.
- Pruebas contrarreloj: pueden ser individuales o por equipos.

Las bicicletas se caracterizan por tener las ruedas muy finas, lisas y un diámetro de 28" un poco superior al de una bici de montaña. Son bicis pensadas para tener una resistencia aerodinámica baja y un peso reducido. Poseen varias marchas para poder adaptarse a la inclinación del terreno. La geometría de la bicicleta está diseñada para proporcionar una postura inclinada y así reducir la resistencia aerodinámica del ciclista. Un ejemplo de esta bicicleta es la figura *figura104*.



Figura 104. Bicicleta ciclismo en ruta.

Ciclismo en pista

Es una modalidad interior, las pruebas se realizan en un velódromo. Hay diferentes pruebas como por ejemplo velocidad individual, Madison, persecución o eliminación.

Las bicicletas son similares a la figura *figura104* pero presentan algunas modificaciones. La altura del eje de pedalier de las bielas es superior para evitar tocar el suelo con el pedal y no poseen marchas, es plato y piñón únicos.

Cross country (XC)

Es una modalidad de montaña más conocida. La pista puede ser un circuito cerrado campo a través con cuestras de subida y de bajada o puede un recorrido de un punto de partida a un punto de llegada. En ambos casos se trata de ir lo más rápido posible por un terreno no muy abrupto. Las bicicletas de este tipo son muy ligeras con poco recorrido de suspensión (80-120mm) y ángulo de dirección vertical cercano a 70° . Pueden ser con suspensión delantera o delantera y trasera como vemos en las figuras *figura 105*, *figura 106*.



Figura 105.. Bicicleta XC suspensión delantera.



Figura 106. Bicicleta XC doble suspensión.

Allmountain/trail

Es la disciplina en la que no se busca hacer el tiempo más rápido sino ir campo a través con una bici cómoda que nos permita atravesar zonas técnicas, saltos y tramos de pedaleo. Para ello la bicicleta cuenta con doble suspensión y unos recorridos comprendidos entre 140 y 160 mm. El ángulo de dirección es más inclinado que en Cross Country y se sitúa en torno a 67° . La figura *figura107* es un ejemplo de bicicleta.



Figura 107. Bicicleta de All Mountain.

Enduro

Es una modalidad en la que predominan los tramos de bajada y tramos técnicos aunque también hay zona de pedaleo y ascenso. El terreno está formado por piedras, raíces y saltos. Las bicicletas tienen un recorrido de 160-180mm y un peso más elevado que las bicicletas All Mountain. El ancho de manillar es bastante ancho de 740-760mm y los neumáticos también son de balón ancho 2,2-2,4 “. El ángulo de dirección está en torno a 67°. Un ejemplo de este tipo de bici es la ilustración *figura 108*.



Figura 108. Bicicleta enduro.

Freeride

Esta modalidad consiste en superar obstáculos tanto en la naturaleza como en la ciudad. Los obstáculos son saltos de gran tamaño, escaleras, cortados, zonas muy abruptas. Para ello se emplean bicicletas reforzadas con tubos de chasis de gran tamaño. Los recorridos de estas bicicletas van desde 160mm hasta 200mm. El ángulo de dirección tiene un rango de 64-67° depende del fabricante. El ancho de las ruedas va desde 2,3" a 3". Antiguamente este tipo de bicicletas se reforzaban enormemente y alcanzaron algunas marcas recorridos de 300mm y un peso de más de 20 kg. Hoy en día modalidad ha evolucionado reduciendo el peso a 17-18kg y el uso de suspensiones de 180mm que son más versátiles para hacer piruetas durante los saltos. Es una disciplina en la que hay más libertad y el ciclista elige por donde realizar el camino. Un ejemplo de competición de esta disciplina es el Red Bull Rampage en la que los jueces puntúan el recorrido que ha realizado el piloto al bajar por la ladera de una montaña repleta de saltos. Las bicicletas freeride son muy similares a las bicicletas de descenso, se diferencian en que están pensadas para pedalear ciertos tramos, la distancia entre ejes es menor, el ángulo de dirección es más vertical y las suspensiones tienen menos recorrido pero son más versátiles que las bicicletas de descenso. Unas fotografías que nos muestran todo esto son las siguientes *figura 109, figura 110*:

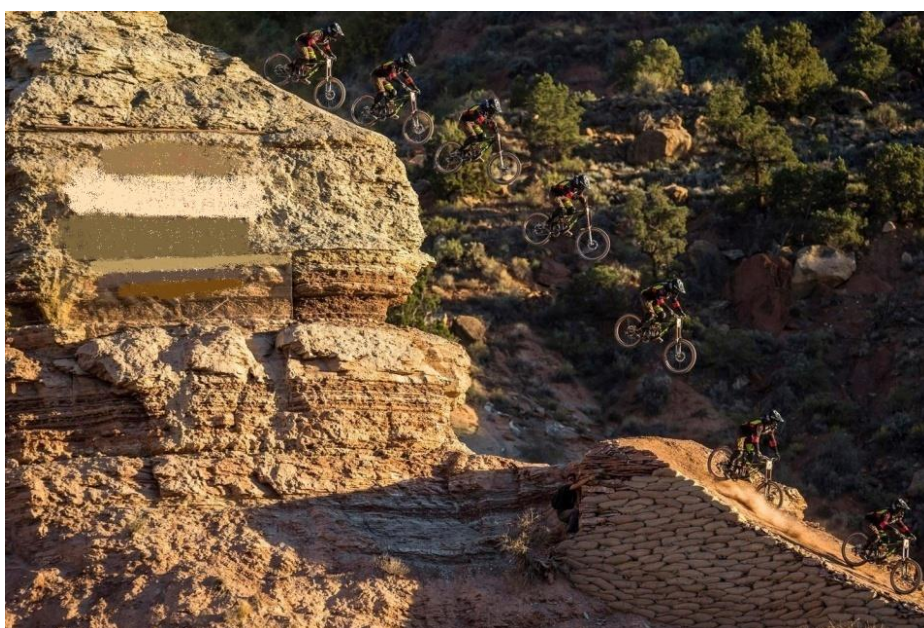


Figura 109. Red Bull Rampage.



Figura 110. Bicicleta de freeride.

Ciclocross

Es una modalidad que mezcla asfalto, tierra y obstáculos y las bicis usadas son bicicletas de carretera con unos neumáticos finos pero que presentan tacos para aumentar el agarre fuera del asfalto. La figura **figura104** es una representación válida de este modelo de bicicletas.

BMX

Es una disciplina en la que las bicicletas tienen tamaño más pequeño. Usan ruedas de 20" y el chasis se asemeja a una bicicleta de niño. Carecen de marchas y de suspensiones y el chasis al ser tan compacto es muy resistente. Se usan aleaciones de acero por eso los tubos parecen muy delgados pero son muy duros. Todo esto da como resultado una gran maniobrabilidad para hacer todo tipo de acrobacias y superar todo tipo de obstáculos urbanos como bordillos, escaleras, barandillas... En la siguiente imagen **figura 111** se aprecia una BMX.



Figura 111. Bicicleta bmx

Dirt/ Slopestyle

En este tipo de competiciones lo que se busca es realizar piruetas en el aire y para ello se usan saltos muy verticales que se consigue una gran altura y esto implica mayor tiempo en el aire para hacer “tricks”. Los jueces puntúan la dificultad, amplitud y otros parámetros de los saltos que realiza el ciclista. Las bicicletas de dirt son muy similares a una bicicleta BMX pero con un tamaño de ruedas mayor que suele ser 26” y se diferencian en que tienen suspensión delantera de recorrido entorno a 100mm. Un ejemplo de bicicleta de dirt es el siguiente *figura 112*:



Figura 112. Bicicleta de dirt.

Trial

Es una disciplina en la que el manejo de la bicicleta es extremo. Consiste en superar obstáculos en ausencia de velocidad solamente usando el equilibrio e impulsos para saltar de una roca a otra o saltos entre barandillas etc. La bicicleta tiene la rueda trasera de mayor grosor de neumático que la delantera ya que todo el peso del piloto cae sobre ella al realizar los saltos. El chasis es muy bajo para evitar golpes con el cuerpo. Todo ello se aprecia mejor en la siguiente figura *figura 113*.



Figura 113. Bicicleta de trial.

Anexo 6: Integración numérica. Regla del trapecio.

En este anexo se muestra como a partir de la aceleración registrado por el sensor se puede obtener la velocidad y posición haciendo uso de la integración numérica.

Los resultados mostrados provienen de la aceleración en el eje X del sensor MPU6050 en el test de obstáculo conocido a 12km/h.

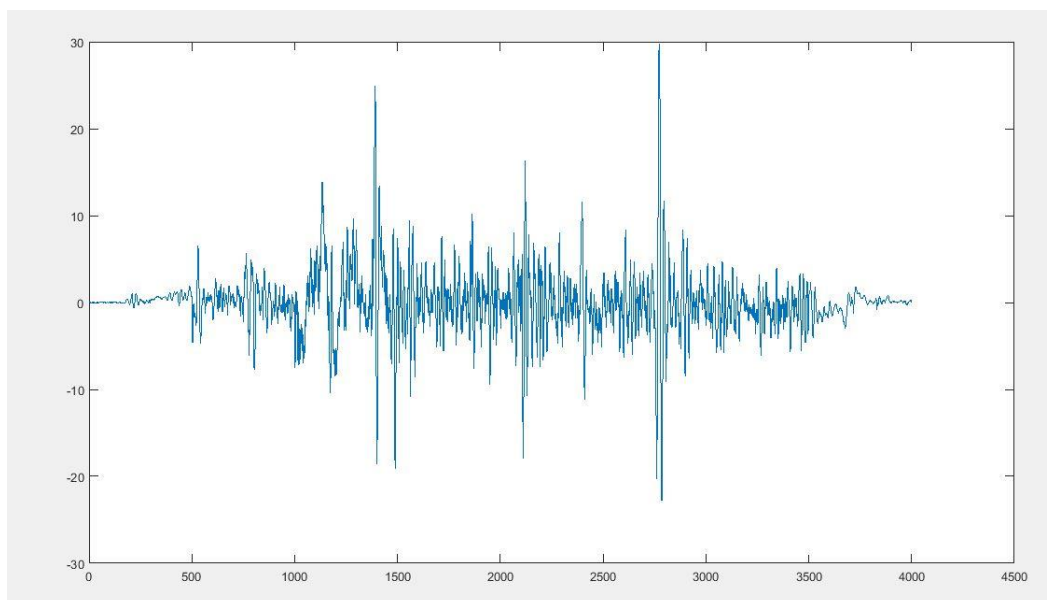


Figura 114. Resultados de aceleración sensor MPU6050 en eje X en test de ladrillo a 12km/h.

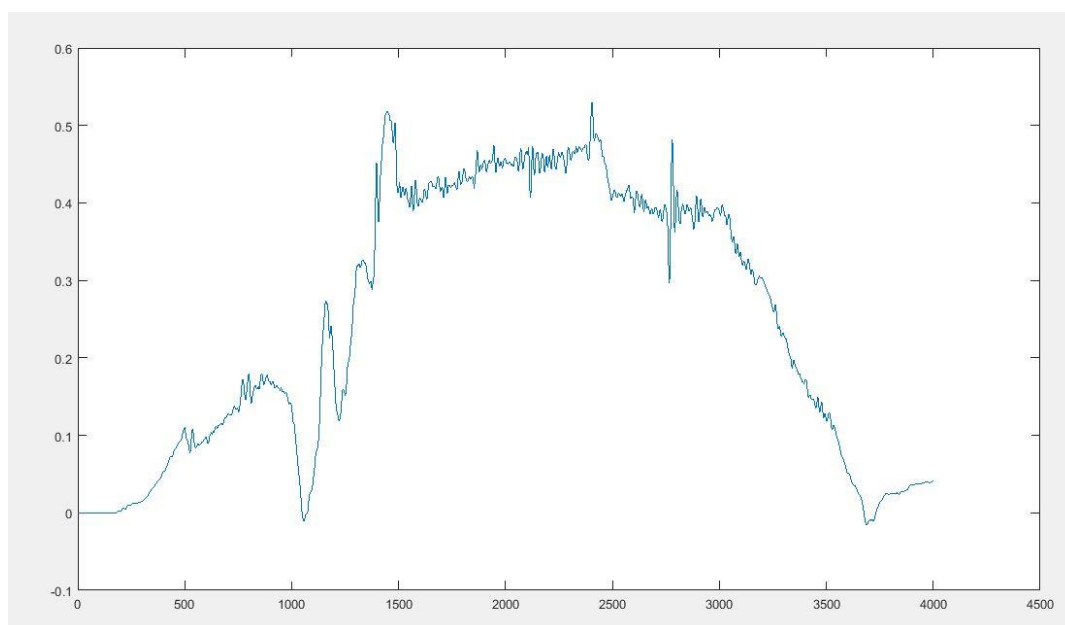


Figura 115. Resultados de velocidad sensor MPU6050 en eje X en test de ladrillo a 12km/h.

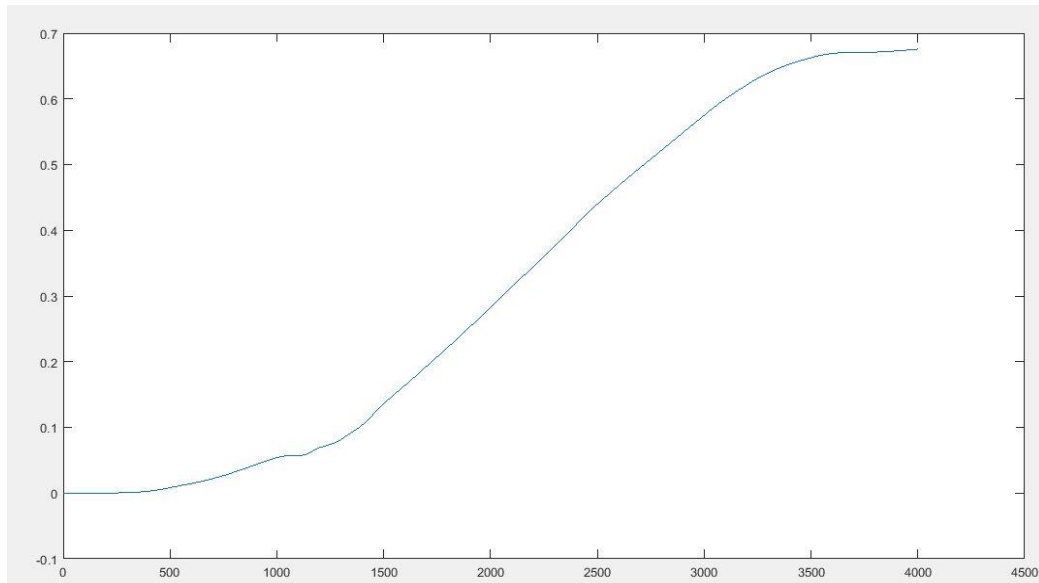


Figura 116. Resultados de posición sensor MPU6050 en eje X en test de ladrillo a 12km/h.

En el eje X se representa el número de muestra en el eje Y la aceleración en m/s^2 , la velocidad en m/s y la posición en m respectivamente. Como se puede observar la magnitud es errónea ya que al impactar la bici contra el ladrillo no se eleva 0.7m respecto el suelo.

Es necesario aplicar filtros para conseguir unos resultados más certeros. Una prueba de ello es la referencia [14] que consigue errores de posición menor a 2% en una prueba de movimiento lineal de 10cm.

Usando la velocidad y posición del sensor MPU6050 y comparándolo con la velocidad y posición del sensor MMA7341L mediante la resta de ambos podríamos obtener el recorrido usado por la suspensión y la velocidad de la misma.

Anexo 7. Programación Arduino Due.

En este anexo se muestran las instrucciones principales usadas en la programación de Arduino Due para este Trabajo Fin de Grado [22].

Sensor MPU6050

En este apartado se muestra como se realiza la lectura de aceleración y como se configura el sensor con la sensibilidad necesaria.

```
#include<Wire.h> // librería I2C contenida por defecto en el software oficial

// Declaramos con 16 bit sino Arduino Due usaría 32 bit malgastando memoria.

int16_t aceX, aceY, aceZ=0;

// Ejemplo de cambiar el valor de un registro
// Para cambiar la escala del fondo de escala a 8G
// REGISTRO 28 configurar el fondo de escala acelerómetro
// Dirección 0x68 en bus I2C del MPU-6050 si el pin AD0 está conectado a GND

Wire.beginTransmission(0x68);
Wire.write(0x1C); // registro 28 de la escala

// 16=b'00010000' escala +-8g, El registro es de 8 bit y mediante el bit 4 y el bit 3
// podemos configurar la escala a 2,4,8,16G

Wire.write(16);
Wire.endTransmission(true); // detener la transmisión

// Para realizar las lecturas de aceleración en el programa principal

Wire.beginTransmission(0x68);
Wire.write(0x3B); // Empezamos por el registro de aceleración en eje X
Wire.endTransmission(false); // mantenemos la comunicación activa
Wire.requestFrom(0x68, 4, true);

// Necesitamos 4 registros, 2bytes por cada variable,
// La función Wire.read(); devuelve 1 byte solo
// hay que hacer 2 lecturas para los 16 bits de información

aceX=Wire.read()<<8|Wire.read();
aceY=Wire.read()<<8|Wire.read();
```

```

/*
aceX = Wire.read() << 8; se leen los 8 bits más significativos del primer registro
y se desplazan ocho ceros | es una puerta or aceX |= Wire.read(); se leen los 8 bits
menos significativos donde antes estaban los ceros el resto se rellena con '0' es decir
aceX = Wire.read() << 8; --> "ddddddd000000" aceX |= Wire.read();
"00000000ddddddd" la d es dato leído , con el operador | lo que hace es una
"concatenacion"y nos quedamos con todos los datos "ddddddddddddddd" porque el dato
d tiene "preferencia" antes que el cero ,1|0=1, 0|0=0----> d|0=d
*/

```

Sensor MMA7341L

En este apartado se muestra como se realiza la lectura de aceleración. La configuración de la sensibilidad necesaria se hace mediante hardware conectado el pin g-select a Vcc para tener 11G.

// correspondencia entre entradas analógicas y pines Arduino Due

```

Int entradaX=A4;
Int entradaY=A5;
Int entradaZ=A6;

```

// Declaramos con 16 bit sino Arduino Due usaría 32 bit malgastando memoria.

```

int16_t aceX,aceY,aceZ=0;

```

```

analogReadResolution(11);

```

// trabajaremos con 11 bits de resolución en lugar de 12 ya que el ruido del sensor es mayor que la resolución a 12 bit y genera variaciones en la lecturas por dicho ruido

```

aceX=analogRead(entradaX); // leer el pin A4 del Arduino
aceY=analogRead(entradaY); // leer el pin A5 del Arduino

```

Módulo lector microSD

En este apartado se expone la programación necesaria para el uso de este módulo.

```

#include<SD.h> // librería contenida por defecto en el software oficial

```

```

File sd; // declaramos un objeto llamado sd

```

```

pinMode(10,OUTPUT); // pin 10 modo salida para el chip select CS del bus SPI

```

```

SD.begin(10); // iniciamos la comunicación

```

```

sd=SD.open("Test.txt",FILE_WRITE); // Creamos un fichero de texto para escribir

```

```

sd.println("hola"); //enviamos hola al fichero de texto

```



```
sd.flush();
```

//guarda todo lo que contenga el fichero de texto en ese momento, sin esta instrucción el fichero de texto tras apagar el sistema no tendría ningún dato guardado. Se demora unos 160ms por eso en nuestro sistema guardamos los datos cada 500 muestras

LCD HD44870

En este apartado se expone la programación necesaria para el uso de la pantalla LCD.

```
#include<LiquidCrystal_I2C.h>
```

//Librería descarga de la página oficial de
Arduino<http://playground.arduino.cc/Code/LCDi2c>

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);
```

// Declaramos un objeto lcd con dirección I2C de nuestra pantalla ,0x27, y su tamaño 16 columnas y 2 filas

```
lcd.init(); // inicializa lcd, limpia la pantalla y sitúa el cursor en (0,0)lcd.backlight();//  
enciende la iluminación de la pantalla
```

```
lcd.display(); // activa mostrar contenido por pantalla
```

```
lcd.print(" ON");// muestra mensaje ON por la pantalla
```

```
delay(2000);
```

```
lcd.setCursor(0, 1);// bajar cursor
```

```
lcd.print("CHECKING DEVICES");
```

```
delay(2000);
```

```
lcd.clear();// borra el contenido de la pantalla
```